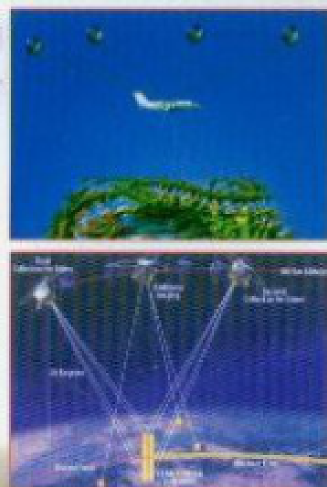


高等学校教材

GPS测量原理及其应用

胡伍生　高成发　主编
施一民　主审



人民交通出版社
China Communications Press

高等学校教材

GPS CELIANG YUANLI JIQI YINGYONG

GPS测量原理及其应用

胡伍生　高成发　主编
魏一民　　　　　主审

人民交通出版社

内容提要

本书为面向21世纪交通版高等学校教材，全面介绍了GPS测量的基本原理及其应用。主要内容有：卫星大地测量基本知识、GPS定位的基本原理、差分GPS定位原理、GPS测量控制网设计与实施、GPS测量数据处理、GPS精密高程测量以及GPS工程应用等。

本书概念清晰、通俗易懂、实用性强，可作为高等院校有关专业的通用教材，也可供测绘、交通、城建、水电、地质、采矿等部门从事GPS工作的科技工作者参考。

图书在版编目（CIP）数据

GPS测量原理及其应用／胡伍生，高成发主编．—北京：人民交通出版社，2002.8

ISBN 7-114-04404-6

Ⅰ.G... Ⅱ.①胡...②高... Ⅲ.全球定位系统(GPS)—测量 Ⅳ.P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字（2002）第056489号

高等学校教材

GPS测量原理及其应用

胡伍生　高成发　主编

施一民　　　　主审

正文设计：彭小秋　责任校对：尹　静　责任印制：杨柏力

人民交通出版社出版发行

（100011　北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号）

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本：787×1092　1/16　印张：15.75　字数：366千

2002年10月　第1版

2004年7月　第1版　第2次印刷

印数：4001～7000册　定价：28.00元

ISBN 7-114-04404-6

U·03245

面向21世纪交通版

高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

总　序

当今世界，科学技术突飞猛进，全球经济一体化趋势进一步加强，科技对于经济增长的作用日益显著，教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪，面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点，我国的高等教育迎来了良好的发展机遇，同时也面临着巨大的挑战，高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一，加入WTO，中国经济已融入到世界经济发展的进程之中，国家间的竞争更趋激烈，竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上，因此，高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二，我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期，这一时期，我国经济结构调整将进一步深化，对外开放将进一步扩大，改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题，高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求，党中央国务院提出扩大高等教育规模，着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤，同时，也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要，早在1998年7月，教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中，土木工程专业扩大了涵盖面，原先的公路与城市道路工程，桥梁工程，隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养"宽口径"复合型人才的要求，对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养21世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的，面对新的变化，要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整，以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求，同时，也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求，人民交通出版社通过对"八五"、"九五"期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析，提出了组织编写一套面向21世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想，得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000年6月，由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的12所高校的专家学者组成面向21世纪交通版高等学校教材（公路类）编审委员会，并召开第一次会议，会议决定着手组织编写土木工程专业具有交通特色的**道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材**。会议经过充分研讨，确定了包括**基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次**以及**教学辅助层次**在内的约130种教材，范围涵盖本科与研究生用教材。会后，人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作，经过自由申报及专家推荐的方式，近20所高校的百余名教授承担约130种教材的主编工作。2001年6月，教材编委会召开第二次会议，全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲，之后，编写工作全面展开。

面向21世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是：(1)顺应高等教育改革的形势，专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通，同时保留原专业的主干课程，既顺应向土木工程专业过渡的需要，又保持服务公路交通的特色，适应宽口径复合型人才培养的需要。(2)注重学生基本素质、基本能

力的培养，将教材区分为二个主层次与一个辅助层次，即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次，辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前，中国的经济发展存在地区间的不平衡，各高校之间的发展也不平衡，因此，教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求，尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上，注意体现原创性内容，把握好技术发展与教学需要的关系，努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求，着力提高学生的创新思维能力，使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展，积极配套相应的教学辅件，便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一，全面做好教材建设工作，是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织，由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材，教材力求反映交通科技发展的先进水平，力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定，他们都是各校相关学科的骨干，在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编，能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐，随后，将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版，对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用，同时，也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是，该批教材中研究生教材占有较大比例，研究生教材多具有较高的理论水平，因此，该套教材不仅对在校学生，同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21世纪初叶，是我国社会经济发展的重要时期，同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期，公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务，希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力，尽快使全套面向21世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世，为我国交通事业的发展做出贡献。

面向21世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001年12月

前　　言

全球定位系统(Global Positioning System)是美国国防部为陆、海、空三军研制的新一代卫星导航定位系统。目前,GPS卫星定位技术正广泛应用于测绘、导航、通讯和其它许多领域。随着全球定位系统的不断改进,硬、软件的不断完善,应用领域正在不断地拓广。从发展趋势看,GPS卫星定位技术还将更加深入和普及到我国的国民经济建设乃至人们的日常生活之中。

GPS的出现,给测绘学科带来了巨大的变革,GPS测量技术已成为测绘学科中极其重要和必不可少的内容。东南大学、河海大学和南京工业大学共同编写了《GPS测量原理及其应用》教材,以适应普通工科院校测绘工程专业及相关专业开设GPS课程教学的需要。

本书由胡伍生、高成发主编,参加编写的有东南大学胡伍生(第9、10章)、高成发(第2、3章)、吴向阳(第1、8章、附录),河海大学岳东杰(第4、7章)、南京工业大学李明峰(第5、6章)。

本书力求做到理论与工程实际相结合,反映当前的最新技术。尽管我们尽了很大的努力,但由于GPS测量技术是一种新兴的科学技术,发展日新月异,同时也由于编者水平和实际经验有限,书中还可能存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

2002年3月于南京

(E-mail:ws.hu@jlonline.com)

目　录

1 绪 论

全球定位系统(Global Positioning System，简称 GPS)，是随着现代科学技术的迅速发展而建立起来的新一代卫星导航定位系统。本章我们将主要介绍该系统的发展由来、系统的组成、系统的应用特点以及目前美国政府对利用 GPS 的限制性政策等内容。

1.1 GPS 定位系统的发展历史

1.1.1 早期的卫星定位技术

1957 年 10 月 4 日，前苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星。从此之后，世界各国争相利用人造卫星为军事、经济和科学文化等服务，大地测量学也取得了惊人的发展，迅速跨入了一个崭新的时代。

随着人造地球卫星的入轨运行，利用卫星进行定位测量已成为现实，从而产生了卫星大地测量学。卫星大地测量就是利用人造地球卫星为大地测量服务的一门学科。它的主要内容是在地面上观测人造卫星，通过测定卫星位置的方法，来解决大地测量的任务，如测定地面点的相对位置和绝对位置，测定地球的形状和大小以及地球引力场参数等。

在利用人造地球卫星进行测量的初期，人造地球卫星仅仅作为一种空间的观测目标，由地面上的测站对它进行摄影观测而测定地面点位，此法称之为卫星三角测量，它是卫星定位的低级阶段。

如图 1.1 所示，在相距数千公里的 A、B 两个测站，各安设一台卫星摄影机，在晴朗的夜晚，以恒星为背景，A、B 两个测站对同一颗人造地球卫星(下文简称卫星) S_1 进行同步摄影，由此得到的摄影底片，既有卫星 S_1 的影像 S_a、S_b，又有某些恒星的影像；从天文年历中查出有关恒星的坐标，并在摄影底片上精确量测出卫星坐标，依此推算出 A、B 测站至卫星 S_1 的方向 $\overrightarrow{as_1}$、$\overrightarrow{bs_1}$，从而获得一个同步平面 AS_1B。在 A、B 测站对另一颗卫星 S_2(或同一颗卫星的另一个位置)再进行一次同步摄影，又可推算出 A、B 测站至卫星 S_2 的方向 $\overrightarrow{as_2}$、$\overrightarrow{bs_2}$，得到另一个同步平面 AS_2B，AS_1B 平面与 AS_2B 平面的交线，便是连结 A、B 测站的弦线 ab。同理，当 A、C 测站进行两次同步摄影时，亦可求得连结 A、C 测站的弦线 ac。若已知 A、C 测站的坐标，则可求得待定点 B 的坐标；如果 A、C 测站位

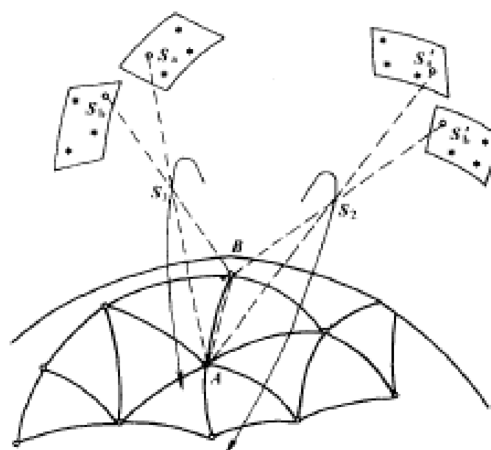


图 1.1 卫星三角测量

于陆地上，B 测站处于远海岛屿上，用上述卫星摄影观测的方法，就可以实现大陆和海岛的联测定位，这是常规定位技术望尘莫及的。

1966 年至 1972 年间，美国国家大地测量局在英国和前联邦德国测绘部门的协作下，用上述卫星三角测量方法测设了一个具有 45 个测站的全球卫星三角网，获得了 5 m 的点位精度。由于卫星三角测量受卫星可见条件及天气的影响，费时费力，定位精度又不甚理想，且不能得到点位的地心坐标，因此卫星三角测量成为一种过时的观测技术，很快就被卫星多普勒定位所取代。

1.1.2 卫星多普勒定位系统

卫星多普勒定位已进入了卫星定位的高级阶段。此时，卫星不再作为一种单纯的空间观测目标，而是一种通过其轨道参数介入定位的动态已知点。观测方式从量测卫星方向转到测量地面测站至卫星的距离或距离差。

1958 年 12 月，美国海军和霍普金斯(Hopkins)大学应用物理实验室，为了给北极星核潜艇提供全球性导航，开始研制一种卫星导航系统，称之为美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System)，简称为 NNSS。1959 年 9 月发射了第一颗试验性卫星，到 1961 年 11 月，先后共发射了 9 颗试验性导航卫星。经过几年的试验研究，解决了导航卫星的许多技术问题。1963 年 12 月起，陆续发射了 6 颗工作卫星组成子午卫星星座，使得地球表面上任何一个测站上，平均每隔 2h 便可观测到其中一颗卫星。由于这些卫星的轨道均经过地球的南北极上空，故称为子午卫星。卫星高度在 950 ~ 1200km 之间，卫星运行周期约为 107min，轨道近似于圆形。

卫星多普勒定位系统即美国海军卫星导航系统，它由三部分组成，除了以上围绕地球运行的子午卫星外，还有地面跟踪网以及用户接收机。地面跟踪网又由跟踪站、计算中心、注入站、海军天文台和控制中心五部分组成。它们的任务是测定各颗卫星的轨道参数，并定时将这些轨道参数和时间信号注入到相应的各颗卫星内，以便卫星按时向地面播发。接收机是用来接收卫星发射的信号、测量多普勒频移、解译卫星的轨道参数，以测定接收机所在位置的设备。由于这些接收机都是采用多普勒效应原理进行接收和定位的，所以也称为多普勒接收机。

1967 年 7 月 29 日，美国政府宣布解密子午卫星的部分电文供民间使用。自此以后，卫星多普勒定位技术迅速得到了广泛的应用。实践证明，卫星多普勒定位具有经济快速、精度较高、不受天气和时间限制等优点，只要能见到子午卫星，便可在地球表面上的任何地方进行单点定位或联测定位，从而获得测站的三维地心坐标。因此世界上许多国家都引进卫星多普勒定位技术为本国服务。

20 世纪 70 年代中期，我国开始引进卫星多普勒接收机。西沙群岛的大地基准联测，是我国应用卫星多普勒定位技术的首例。自 20 世纪 70 年代后期以来，我国开展了几次较大规模的卫星多普勒定位实践：例如，国家测绘局和总参测绘局于 1979 年开始联合测设的全国卫星多普勒大地网；由原武汉测绘科技大学与青海石油管理局、新疆石油管理局、原石油部地球物理勘探局合作测设的西北地区卫星多普勒定位网；1987 年开始测设的全国陆地海洋卫星定位网以及 1985 年南极长城考察站的建站测量等。

卫星多普勒定位技术在我国经历了十多年的应用和发展历程，是卫星定位技术对我国常规定位技术形成的第一次历史性的冲击波。卫星定位的理论和技术开始在大地测量工作者中普及，许多大地测量研究工作也转到了这个方向。我国在多普勒定位理论、数据处理、软件开发方面都取得了一批在当时已接近世界先进水平的成果，为我国卫星定位的发展打下了一个

很好的基础。

卫星多普勒定位系统虽然在导航和定位技术方面前进了一大步，但仍然存在着一些明显的缺陷，如该系统的卫星数目较少(5～6颗)，运行轨道高度较低(平均约1000km)，从地面站观测到卫星的时间间隔较长(平均约1.5h)，无法进行全球性的实时连续导航定位，且其精度还不够理想(采集2天以上的定位数据，可以达到分米级的定位精度)，因此其应用受到了很大的限制。为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航和定位，第二代卫星导航系统——GPS全球定位系统便应运而生。

1.1.3 GPS全球定位系统

美国国防部在总结了NNSS的优劣之后，1973年12月批准研制新一代的卫星导航系统——导航卫星定时测距全球定位系统(Navigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System)，简称GPS系统。它可以向数目不限的全球用户连续地提供高精度的全天候三维坐标、三维速度以及时间信息，因而广泛地应用于飞机、船舶和各种载运工具的导航、高精度的大地测量、精密工程测量、地壳形变监测、地球物理测量、海空救援、水文测量、近海资源勘探、航天发射及卫星回收等技术领域。

自1974年以来，GPS系统的建立经历了方案论证、系统研制和生产试验等三个阶段，总投资超过200亿美元，这是继阿波罗计划、航天飞机计划之后的又一庞大的空间计划。1978年2月22日，第一颗GPS试验卫星发射成功；1989年2月14日，第一颗GPS工作卫星发射成功，宣告GPS系统进入了生产作业阶段；1994年全部完成24颗工作卫星(含3颗备用卫星)的发射工作。据报道，子午卫星系统也于1996年12月31日停止发射导航及时间信息。GPS系统与NNSS系统的主要特征见表1.1。

GPS系统的出现，使卫星定位技术发展到了一个辉煌的历史阶段。

GPS与NNSS的主要特征　　表1.1

项　　目	GPS 系 统	NNSS 系 统
载波频率(MHz)	1227.60，1575.42	150，400
轨道高度	20200 km	1000 km
卫星数目(颗)	24(3颗备用)	5～6
卫星运行周期	720 min	107 min
卫星钟	铯钟、铷钟	石英钟
定位方式	测距	测定多普勒频移
可用性	连续，实时	15～20min

1.2 GPS的组成

GPS系统由三大部分组成：

空间星座部分：包括GPS工作卫星和备用卫星；

地面监控部分：控制整个系统和时间，负责轨道监测和预报；

用户设备部分：主要是各种型号的接收机。

1.2.1 空间星座部分

全球定位系统的空间卫星星座由21颗工作卫星和3颗随时可以启用的备用卫星所组成。如图1.2所示，24颗卫星均匀分布在6个轨道面内，每个轨道面均匀分布有4颗卫星。卫星轨道平面相对地球赤道面的倾角均为55°，各轨道平面升交点的赤经相差60°，在相邻轨道上，卫星的升交距角相差30°。轨道平均高度约为20200km，卫星运行周期为11小时58分。因此，同一观测站上，每天出现的卫星分布图形相同，只是每天提前约4min。地面观测者见到地平面上的卫星颗数随时间和地点的不同而异，最少为4颗，最多可达11颗。

目前GPS系统已经建成，其工作卫星在空间的分布保障了在地球上任何时刻、任何地点均至少可以同时观测到4颗卫星，加之卫星信号的传播和接收不受天气的影响，因此GPS是一种全球性、全天候的连续实时定位系统。

空间部分的3颗备用卫星，将在必要时根据指令代替发生故障的卫星，这对于保障GPS空间部分正常而高效地工作是极其重要的。

迄今为止，GPS卫星已设计了三代，分别为BlockI、BlockII、Block III。第一代(Block I)卫星，用于全球定位系统的实验，通常称为GPS实验卫星。这一代卫星共研制和发射了11颗，实验卫星设计寿命为5年，现已停止工作。第二代(BlockII)卫星，用于全球定位系统的正式工作，称为GPS工作卫星。第二代卫星共研制和发射了28颗，卫星的设计寿命为7.5年，于1994年发射完毕。第三代(BlockIII)卫星，于20世纪90年代末期开始陆续发射，大约数量为20颗，以取代第二代卫星，用于改善全球定位系统。

图1.3是GPS工作卫星的外形结构。主体呈圆柱形，直径约为15m，重约774kg(包括310kg燃料)，星体两侧各伸展出一块由四叶拼成的太阳能电池翼板，其面积为72m²，能自动对准太阳，以保证卫星正常工作用电。卫星姿态调整采用三轴稳定方式，使螺旋天线阵列所辐射的波速对准卫星的可见地面。

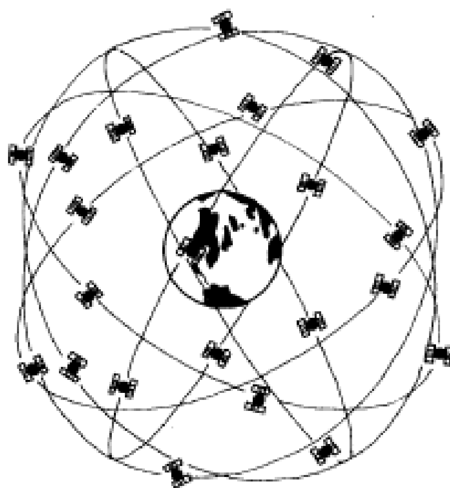


图1.2 GPS卫星星座

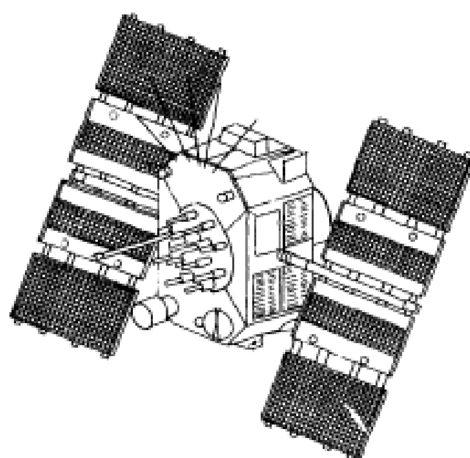


图1.3 GPS卫星构造示意图

在GPS系统中，GPS卫星的作用是：

(1)向广大用户连续发送定位信息；

(2)接收和储存由地面监控站发来的卫星导航电文等信息，并适时地发送给广大用户；

(3)接收并执行由地面监控站发来的控制指令，适时地改正运行偏差或启用备用卫星等；

(4)通过星载的高精度铷钟和铯钟，提供精密的时间标准。

GPS 卫星的核心部件是高精度的时钟、导航电文存储器、双频发射和接收以及微处理机，而对于 GPS 定位成功的关键在于高稳定度的频率标准。这种高稳定度的频率标准由高精度的原子钟提供，因为 10^{-9}s 的时间误差将会引起 30cm 的站心距离误差。为此，每颗 GPS 工作卫星一般安设 2 台铷原子钟和 2 台铯原子钟，并计划未来采用更稳定的氢原子钟(其频率稳定度优于 10^{-14}s)。GPS 卫星虽然发送几种不同频率的信号，但是它们均源于一个基准信号(其频率为 10.23GHz)，所以只需启用一台原子钟，其余作为备用。卫星钟由地面站检验，其钟差、钟速连同其它信息由地面站注入卫星后，再转发给用户设备。

1.2.2 地面监控部分

为了确保 GPS 系统的良好运行，地面监控系统发挥了极其重要的作用。其主要任务是：监视卫星的运行；确定 GPS 时间系统；跟踪并预报卫星星历和卫星钟状态；向每颗卫星的数据存储器注入卫星导航数据。

地面监控部分包括一个主控站、三个注入站和五个监测站，其分布如图 1.4 所示。



图 1.4 GPS 卫星的地面监控站分布

(1)主控站

主控站设在美国本土科罗拉多州斯本斯空间联合执行中心。除负责管理和协调整个地面监控系统的工作外，其主要任务是根据本站和其它监测站的所有跟踪观测数据，计算各卫星的轨道参数、钟差参数以及大气层的修正参数，编制成导航电文并传送至各注入站；主控站还负责调整偏离轨道的卫星，使之沿预定轨道运行。必要时启用备用卫星以代替失效的工作卫星。

(2)监测站

监测站是在主控站控制下的数据自动采集中心。全球共有 5 个监测站，分布在美国本土和三大洋的美军基地上，主要任务是为主控站提供卫星的观测数据。每个监测站均用 GPS 接收机对可见卫星进行连续观测，以采集数据和监测卫星的工作状况，所有观测数据连同气象数据传送到主控站，用以确定卫星的轨道参数。

(3)注入站

三个注入站分别设在南大西洋的阿松森群岛、印度洋的狄哥伽西亚岛和南太平洋的卡瓦加兰岛。其主要任务是将主控站发来的导航电文注入到相应卫星的存储器，每天注入 3～4 次。此外，注入站能自动向主控站发射信号，每分钟报告一次自己的工作状态。全球共有 3 个地面天线站，分别与 3 个监测站重合。

整个 GPS 的地面监控部分，除主控站外均无人值守。各站间用现代化的通讯网络联系起来，在原子钟和计算机的精确控制下，各项工作实现了高度的自动化和标准化。

1.2.3 用户设备部分

GPS用户设备部分主要包括:GPS接收机及其天线,微处理器及其终端设备以及电源等。而其中接收机和天线,是用户设备的核心部分,一般习惯上统称为GPS接收机。

根据接收机的结构,可分为天线单元和接收单元两大部分。一般将两个单元分别装备成两个独立的部件,观测时将天线单元置于测站上,接收单元置于测站附近适当的地方,两者之间用电缆线连成一个整机。也有的将天线单元和接收单元制成一个整体,观测时将其安置在测站点上。

(1)天线单元

它由接收天线和前置放大器两个部分组成。接收天线大多采用全向天线,可接收来自任何方向的GPS信号,并将电磁波能量转化为变化规律相同的电流。前置放大器可将极微弱的GPS信号电流予以放大。

(2)接收单元

信号波道和微处理机构成接收单元的核心部件。从目前的测地型接收机来看,主要有平方型和相关型两种信号波道,所具有的波道数目从1至24个不等。利用多个波道同时对多个卫星进行观测,实现快速定位。微处理机具有各种数据处理软件,能选择合适的卫星进行测,以获得最佳的几何图形;能根据观测值及卫星星历进行平差计算,求得所需的定位信息。

数据记录器用来记录接收机所采集的定位数据,以供测后数据处理之用,目前多用固态存储器取代了以前的磁带记录器。

GPS信号接收机的电池,一般采用机内机外两种直流电源。设置机内电池的目的是在更换外接电池时可以不中断连续观测。当机外电池电压低到某一数值,会自动接通机内电池,当使用机外电池观测时,机内电池能自动地被充电,关机后,机内电池为RAM存储器供电,以防止数据丢失。

视屏监视器一般包括一个显示窗和一个操作键盘,它们均设在接收单元的面板上,观测者通过键盘操作,可从显示窗上读取数据和文字。例如查询仪器的工作状态,检核输入数据的正误等等。

综上所述,接收机的主要功能是:能迅速捕获按一定卫星截止高度角所选择的待测卫星信号,并跟踪这些卫星的运行,对所接收到的卫星信号进行变换、放大和处理,以便测定出GPS信号从卫星到接收天线的传播时间,解译出GPS卫星所发送的导航电文,实时地计算出测站的三维坐标、三维速度和时间等所需数据。

随着GPS定位技术的迅速发展以及应用领域的不断开拓,世界各国对GPS接收机的研制与生产都极为重视,目前世界上GPS接收机的生产厂家约有数百家,型号超过数千种,而且越来越趋于小型化,便于外业观测。我国南方测绘仪器公司也于1991年跨人了GPS接收机的生产行列。

应当指出:GPS接收机作为一个用户测量系统,除了应具有接收机、天线和电源等硬件设备外,其软件部分也是构成现代GPS测量系统的重要组成部分之一。一般来说,软件包括内软件和外软件。所谓内软件是指诸如控制接收机信号通道,按时序对各卫星信号进行量测的软件以及内存或固化在中央处理器中的自动操作程序等。这类软件已和接收机融为一体。而外软件主要是指观测数据后处理的软件系统。一个功能齐全、品质优良的软件不仅能方便用户使用,满足用户的多方面要求,而且对于改善定位精度,提高作业效率和开拓新的应用领域

都具有重要意义。所以软件的质量和功能已成为反映现代 GPS 测量系统先进水平的一个重要标志。有关接收机的详细介绍可参看附录以及相应的仪器说明书。

1.3 GPS 定位系统的特点及用途

1.3.1 GPS 系统的特点

GPS 作为一种导航和定位系统，以其高精度、全天候、高效率、多功能、易操作、应用广等特点著称。

(1)定位精度高

大量的实践和研究表明，用载波相位观测量进行静态相对定位，在小于 50km 的基线上，目前达到的典型精度为 1ppm，而在 100～500km 的基线上可达 0.1ppm。随着观测技术与数据处理方法的不断优化，在大于 1000km 的距离上，相对定位精度可达到 0.01ppm，其精度是惊人的。

在实时动态定位(RTK)和实时差分定位(RTD)方面，定位精度也有了显著性的突破，目前可分别达到厘米级和分米级的定位精度，能满足各种工程测量的要求。

(2)观测时间短

随着 GPS 系统的不断完善，软件水平的不断提高，观测时间已由以前的几小时缩短至现在的几十分钟，甚至几分钟。目前采用静态相对定位模式，观测 20km 以内的基线所需观测时间，对于双频接收机仅需 15～20min；采用快速静态相对定位模式，当每个流动站与基准站相距在 15km 以内时，流动站观测时间只需 1～2min；采取实时动态定位模式，流动站出发时观测 1～2min进行动态初始化，然后可随时定位，每站观测仅需几秒钟。因而用 GPS 技术建立控制网，可以大大提高作业效率。

(3)测站间无需通视

经典测量技术均有严格的通视要求，必须建造大量的觇标，这给经典测量的实施带来了相当的困难。GPS 测量只要求测站上空开阔，与卫星间保持通视即可，不要求测站之间互相通视，因而不再需要建造觇标。这一优点既可大大减少测量工作的经费和时间(一般造标费用约占总经费的 30%～50%)，同时也使选点工作变得非常灵活，完全可以根据工作的需要来确定点位位置，也可省去经典测量中的传算点、过渡点的测量工作。

(4)仪器操作简便

随着 GPS 接收机的不断改进，GPS 测量的自动化程度越来越高，有的已趋于“傻瓜化”。在观测中测量员的主要任务只是安置仪器，连接电缆线，量取天线高和气象数据，监视仪器的工作状态，而其它观测工作，如卫星的捕获，跟踪观测和记录等均由仪器自动完成。结束测量时，仅需关闭电源，收好接收机，便完成了野外数据采集任务。

如果在一个测站上需作较长时间的连续观测，有的接收机还可以实行无人值守的数据采集，通过数据通讯方式，将所采集的数据传送到数据处理中心，实现全自动化的数据采集与处理。另外，现在的接收机体积也越来越小，相应的重量也越来越轻，使得携带和搬运都很方便，极大地减轻了测量工作者的劳动强度，也使野外测量工作变得轻松愉快。

(5)全球全天候定位

GPS 卫星的数目较多，且分布均匀，保证了全球地面被连续覆盖，使得地球上任何地方的

用户在任何时间至少可以同时观测到4颗GPS卫星，可以随时进行全球全天候的各项观测工作。一般除打雷闪电不宜观测外，其它天气(如阴雨下雪、起风下雾等)均不受影响，这是经典测量手段望尘莫及的。

(6)可提供全球统一的三维地心坐标

经典大地测量将平面与高程采用不同方法分别施测，而GPS测量可同时精确测定观测站平面位置和大地高程。目前GPS可满足四等水准测量的精度。GPS测量的这一特点，不仅为研究大地水准面的形状和确定地面点的高程开辟了新途径，同时也为其在航空物探、航空摄影测量及精密导航中的应用，提供了重要的高程数据。

另外，GPS定位是在全球统一的WGS—84坐标系统中计算的，因此全球不同地点的测量成果是相互关联的。

(7)应用广泛

随着GPS定位技术的发展，其应用的领域在不断拓宽。目前，在导航方面，它不仅广泛地用于海上、空中和陆地运动目标的导航，而且在运动目标的监控与管理，以及运动目标的报警与救援等方面，也已获得成功地应用；在测量方面，这一定位技术在大地测量、工程测量与变形监测、地籍测量、航空摄影测量和海洋测绘等各个领域的应用，已甚为普遍。

GPS系统不仅用于测量和导航，还可广泛用于交通、气象、农林等众多相关领域。

1.3.2 GPS在我国的应用和发展

GPS定位技术的问世，除了在导航领域有着十分广泛的应用以外，GPS对于经典的测量领域也是一次重大的技术突破。一方面，它使经典的测量理论与方法产生了深刻的变革，另一方面，也进一步加强了测量学科与其它学科之间的相互渗透，从而促进了测绘科学技术的现代化发展。因此它的出现吸引了世界各国众多科学家的广泛兴趣和普遍关注，也导致了测绘行业发生了根本性的变革。

我国也掀起了GPS的热潮，引进、消化、开发、应用GPS定位技术的势头发展很快。20世纪80年代初期，我国一些院校和科研单位就开始研究GPS技术。十多年来，我国的测绘工作者在GPS定位基础理论研究和应用开发方面做了大量的工作。

20世纪80年代中期，我国开始引进GPS接收机，并应用于各个领域。同时着手研究建立我国自己的卫星导航系统。据有关人士统计，目前我国拥有的GPS接收机数量约在8万台左右，其中有测量类、航空类、航海类、车载类等，而且以每年2万台的速度增加，这充分说明GPS技术在我国各行业中应用的广泛性。

从20世纪80年代末到现在的十多年中，我国实施了一系列重大的GPS卫星测量工程和项目。

在大地测量方面，利用GPS技术开展国际联测，建立全球或全国性大地控制网，提供高精度的地心坐标，测定和精化大地水准面。1992年组织全国10多家单位参加了“中国'92 GPS会战”，建成了由28个点组成的平均边长约100km的GPS国家A级网，提供了亚米级精度的地心坐标基准。此后，在A级网的基础上，我国又布设了平均边长为50~150 km的B级网，总点数约800个，两级网均联测了几何水准，A、B级网的建成为我国各部门的测绘工作提供了高精度的平面和高程三维基准。全国范围的C级网也正在实施之中。另外我国还完成了西沙、南沙群岛各岛屿与大陆的GPS联测，使海岛与全国大地网联成整体。同时还参加了1991年和1992年两期国际GPS联测(IGS)会战，首次进入了国际全球GPS联测计划，为精化我国地心坐

标起到了一定作用。

在工程测量方面，应用GPS静态相对定位技术，布设精密工程控制网，用于桥梁工程、隧道与管道工程、海峡与地铁贯通工程以及精密设备安装工程等；布设变形监测控制网，用于城市和矿区油田地面沉降监测、大坝变形监测、高层建筑变形监测等；应用GPS实时动态定位技术加密测图控制点，用于测绘地形图和施工放样。

在航空摄影测量方面，我国测绘工作者应用GPS技术进行航测外业像片控制测量、航摄飞行导航、机载GPS航测等航测成图的各个阶段。

在地球动力学方面，由于高精度的GPS定位技术可以精确提供有关板块运动的四维信息，因而被用于监测全球板块运动和区域性板块运动以及板块内的地壳变形。我国已开始用GPS技术监测南极洲板块运动、青藏高原地壳运动、四川鲜水河地壳断裂运动，建立了中国地壳形变监测网、三峡库区形变观测网、首都圈GPS形变监测网等。地震部门也已开始在我国多地震活动断裂带布设规模较大的地壳形变GPS监测网。

利用GPS监测活动断裂带的试验已取得了可喜的数据；利用GPS结合VLBI(Very Long Baseline Interferometry，甚长基线干涉)和SLR(Satellite Laser Ranging，激光测卫技术)监测中国地壳运动的有关理论的技术问题研究也已立项，正在加紧实施。

此外，在军事部门、能源交通部门、国土资源部门、城市建设与管理部门以及农业气象等部门和行业，在航空航天、测时授时、物理探矿、姿态测定等领域，也都开展了GPS技术的研究和应用。

与此同时，在我国还广泛深入开展了GPS静态定位和动态定位的理论和技术的研究，研制开发了一系列GPS高精度定位软件和GPS网与地面网联合平差软件以及精密定轨软件，实现了商品化，并打入国际市场。在理论研究与应用开发的同时，培养和造就了一大批技术人才和专业队伍。

近几年，我国GPS卫星定轨跟踪网及GPS精密星历服务工作已取得显著进展。已先后建成了北京、武汉、上海、西安、拉萨、乌鲁木齐等永久性的GPS跟踪站，已实现对GPS卫星进行精密定轨，为高精度的GPS卫星定位提供精密星历服务，致力于我国自主的广域差分GPS方案的建立，参与全球导航定位系统(GNSS)和GPS增强系统(WAAS)的筹建。同时，我国已着手建立自己的卫星导航系统(北斗双星定位系统)，能够生产导航型和测地型GPS接收机。

可以设想，一旦我国形成独立的精密星历服务能力，将进一步扩大GPS应用领域，届时我国的GPS技术水平将接近或达到世界先进水平。现在，GPS定位正在取代常规手段成为我国大地测量的主要技术，标志着我国大地测量技术革命正在向深度和广度的方向发展。

可以预料，随着GPS技术的进一步发展，GPS的应用将进人我们的日常生活，甚至会改变我们的生活方式。所有的运载工具，都将依赖于GPS。手表式的GPS接收机，将成为旅游者的忠实导游。GPS就象移动电话、计算机互联网对我们的生活产生影响一样，人们将离不开它。

1.4 美国的SA政策

1.4.1 美国对GPS用户的主要限制性政策

因为GPS定位技术与美国的国防现代化发展密切相关，所以为了保障美国的利益与安全，限制非经美国特许的用户利用GPS定位的精度，该系统除在设计方面采取了许多保密性

措施外，还自1989年11月开始试验，并于1991年7月正式实施所谓选择可用性(Selective Availability)政策，简称SA政策，即人为地施加误差以降低GPS卫星的星历精度和卫星钟频率精度，以限制广大民间用户利用GPS进行实时(或快速)和较高精度的定位。

GPS卫星发射的无线电信号，含有两种精度不同的测距码，即所谓P码(也称精码)和C/A码(也称粗码)。相应两种测距码，GPS将提供两种定位服务方式，即精密定位服务(PPS)和标准定位服务(SPS)。

精密定位服务，可提供L_1和L_2载波上的P码和L_1载波上的C/A码以及导航电文和消除SA影响的密匙。其主要对象是美国军事部门和其它经美国特许的用户。这类用户可利用P码获得精度较高的观测量，且能通过卫星发射的两种频率信号量测距离，以消除电离层折射的影响。利用PPS单点实时定位的精度可达5~10m。

由于P码是不公开的保密码，非特许的广大用户难以利用。不过，P码的结构后来已被解密，所以美国又引入了新的机密码即W码，并通过P码与W码的模二相加，将P码转换成更为保密的Y码，这也叫做反电子诱骗(Anti-spoofing)，简称AS技术。实施AS技术的目的是使Y码更难于破译，从而给具有接收P码能力的GPS接收机不能很好的进行GPS定位，给非特许用户使用造成障碍。

标准定位服务，仅提供L_1载波上的C/A码和导航电文，其主要对象是广大民间用户。利用SPS所得到的观测量精度较低，且只能采用调制在一种频率上的C/A码测量距离，无法利用双频技术消除电离层折射的影响。其单点实时定位精度约为20~30m。如果在SA政策的实施下，利用SPS的定位精度将降低至约100m(水平)和150m(垂直)，而且这种影响还是可变的。

是否实施SA政策，用户可以根据导航电文中的URA(测距精度)值进行判别。如Trimble4000型接收机，当URA值为20以内时，说明未实施SA政策，当URA值为30~64时，说明实施SA政策。对Ashtech Z12型接收机，当N值为2~3时，未实施SA政策，否则就实施了SA政策。

值得一提的是，美国军方在一年一度评估的基础上，决定将SA信号强度降为零，即停止SA的播放，并已于2000年5月1日开始实行。这将使民用实时定位和导航的精度提高3~5倍。这里要说明一点，美国军方既然已掌握了SA技术，那么可以随时在局部区域内施行SA技术，使敌对方利用GPS时严重降低实时定位精度，无法用于军事行动。

1.4.2 用户摆脱SA限制政策的措施

美国政府对GPS用户所采取的限制性政策，引起了世界各国的广大非特许用户的极大关注。为了摆脱或减弱这种限制性政策的影响，广大用户广泛地开展了许多意义重大的研究、开发与实验工作，并取得了有效的结果。当前采取的主要措施包括：

(1)建立独立的GPS卫星测轨系统

利用GPS卫星，建立区域性或全球性的跟踪系统，以精密地测定卫星的轨道，为用户提供精密星历服务，是一项经济有效的措施。它对开发GPS的广泛应用具有重大意义。

1986年9月，美国联邦地质局和得克萨斯大学使用美国本土的3个跟踪站定轨数据计算精密星历。1987年，加拿大、前联邦德国、瑞典和挪威加入了他们的定轨观测，从而构成了一个国际性的GPS卫星跟踪网，并命名为CIGNET(即Cooperative International GPS Satellite Tracking Network)，它是专门用来测定GPS卫星的精密星历。目前已有分布在欧、亚、非、美、大洋五大

洲的20多个跟踪站参加了CIGNET国际定轨网，我国武汉大学也是其中之一，预计该跟踪网的测轨精度可达分米级。

目前我国除积极参与国际定轨网外，还依靠自己的力量，正在建立以西安、乌鲁木齐、长春、昆明等地作为跟踪站的地区性GPS测轨网，这对我国利用和普及GPS定位技术，推进导航和测绘科学技术的现代化，也具有重要的现实意义。

(2)建立独立的卫星导航与定位系统

目前，一些国家和地区正在发展自己的卫星导航与定位系统。尤其是前苏联的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System - GLONASS)引起了世界各国的普遍兴趣。GLONASS卫星星座如图1.5所示，共有24颗工作卫星(包含3颗备用卫星)，均匀分布在三个轨道面上，轨道面的倾角为64.8°，运行周期为11h15min；卫星信号采用了两种载波，其频率分别为1.6GHz和1.2GHz。该系统已于1995年全部完成，投入运行。目前该系统导航的精度，平面位置约为100m，速度为15cm/s，时间为1μs。

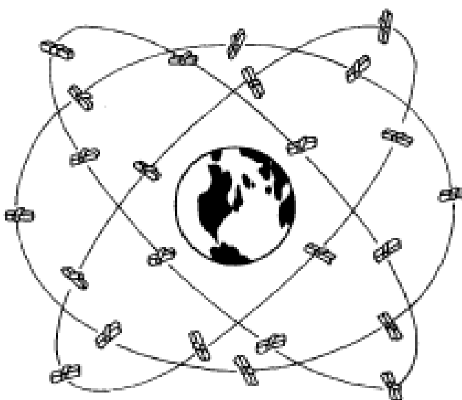


图1.5 GLONASS卫星星座

除此之外，欧洲空间局(European Space Agency——ESA)也正在发展一种以民用为主的卫星定位系统(简称NAVSAT)。该系统包括6颗地球同步卫星和12颗高椭圆轨道卫星。但由于经济上的原因，目前该计划的实施遇到了困难。

上述几种不同卫星定位系统的主要特征如表1.2所列。建立自己的卫星导航与定位系统，尽管可以完全摆脱对美国GPS的依赖，但这是一项技术复杂且耗资巨大的工程，对于经济和技术尚在发展中的国家来说将是困难的。

不同卫星定位系统的主要特征 表1.2

卫星定位系统	卫星数目(颗)	卫星平均高度(km)	卫星运行周期(min)	载波频率(MHz)	
				L_1	L_2
GPS(美国)	24	20200	718	1565～1586	1217～1238
GLONASS(前苏联)	24	19100	675	1597～1617	1240～1260
NAVSAT(欧洲空间局)	18	20178*	720	1561～1569	1224～1232

*高椭圆轨道卫星的平均高度

(3)开发GPS与GLONASS兼容接收机

由于GPS与GLONASS在系统的构成、工作卫星的数目、工作频段及定位的原理等方面都是类似的，所以，研究与开发能同时跟踪、观测两系统卫星信号的兼容接收机，受到世界各国的普遍重视。1996年，Ashtech公司开发生产出GG24和GGRTK接收机，能同时接收GPS和GLONASS两个系统的卫星信号进行定位。GPS/GLONASS一体化接收机的开发，不仅增加了可观测的卫星数目，改善了观测卫星的几何分布，更为重要的是，GLONASS无SA技术限制，可以有效地减弱美国限制性政策的影响，提高了导航定位的安全性、可靠性和精确性，也保证了在有障碍物影响情况下同步观测卫星的个数和定位精度。

(4)发展差分GPS定位技术

差分GPS(Differential GPS——DGPS)，通常主要是指GPS用户应用测距码进行实时相对定

位的技术。由于在相邻两观测站上，SA对同一GPS卫星观测值的影响具有很强的相关性，因此，在一定范围内，采用这一定位技术可以明显地减弱SA等项误差的影响，显著提高定位的精度。

差分GPS定位技术，是目前GPS用户为消除或减弱各种系统误差影响的有效措施之一，因而受到广泛的重视，应用极其普遍。

差分GPS实时定位技术可分为两种类型，即局域差分GPS（LADGPS）和广域差分GPS（WADGPS）。局域差分的技术特点是向用户提供综合的差分GPS改正信息——观测值改正，而不是提供单个误差源的改正。它的作用范围比较小，一般在150km之内。广域差分的技术特点是将GPS定位中主要的误差源分别加以计算，并分别向用户提供这些差分信息，它作用的范围比较大，往往在1000km以上。

应当指出，为了克服美国采取限制政策（SA）的影响，进一步改善GPS接收机对卫星信号的跟踪技术，一些学者正在致力于开发新的数据处理方法和软件，如应用P－W技术和L_1和L_2交叉相关技术，使L_2载波相位观测值得以恢复，其精度与使用P码相同；还有窄相关技术，使得C/A码的多路径效应大大降低，使得用L_1波段的伪距测量精度接近P码技术。这一工作对于发展和普及GPS定位技术，提高定位精度，均具有重要的现实意义。

2 卫星大地测量基本知识

2.1 坐标系统

GPS卫星定位技术是通过GPS接收机同时接收4颗以上GPS卫星发出的信号来测定接收机的位置。观测站固定在地球表面，其空间位置随同地球的自转而运动，而观测目标——GPS卫星却总是围绕地球质心旋转且与地球自转无关。这样，在卫星定位中，需要研究建立卫星在其轨道上运动的坐标系，并寻求卫星运动的坐标系与地面点所在坐标系之间的关系，实现坐标系之间的转换。

卫星定位中常采用空间直角坐标系及其相应的大地坐标系，一般取地球质心为坐标系的原点。根据坐标轴指向的不同，有两类坐标，天球坐标系和地球坐标系。地球坐标系随同地球自转，可看作固定在地球上的坐标系，便于描述地面观测站的空间位置；天球坐标系与地球自转无关，便于描述人造地球卫星的位置。

采用空间直角坐标系便于坐标转换。它可以通过平移和旋转从一个坐标系方便地转换至另一坐标系。空间直角坐标系用位置矢量在三个坐标轴上的投影作为表示空间点位置的一组参数(X,Y,Z)。完全定义一个空间直角坐标系必须明确：(1)坐标原点的位置；(2)三个坐标轴的指向；(3)长度单位。

根据选择的参数不同，还可以有其它形式的坐标系，例如球面坐标系、大地坐标系等。不管采用什么形式，在一个坐标系中都要满足一一对应的关系，即一组具体的参数值(坐标值)只表示唯一的空间点位，一个空间点位也对应唯一的一组参数值(坐标值)。经常使用的球面坐标系和大地坐标系与空间直角坐标系存在着明确、唯一的转换关系，在使用中它们是等价的。

2.1.1 天球坐标系与地球坐标系

所谓天球，指的是以地球质心为球心，以无穷大为半径的一个假想球体。地球自转轴的延长线(也称天轴)与天球的两个交点称为天极，即北天极和南天极。通过地球质心且与天轴垂直的平面称为天球的赤道面。地球绕太阳公转的轨道面与天球相交的大圆称为黄道，黄道与天球赤道有两个交点，其中太阳的视位置由南向北通过赤道的交点称为春分点，另外一点则称为秋分点。

笼统地说，以地心 O 为坐标原点的天球坐标系，其 Z 轴指向北天极，X 轴指向春分点，Y 轴垂直 XOZ 轴并构成右手坐标系。

描述人造卫星的位置采用球面坐标系较为方便。在已定义的右手直角坐标系中，可按如下方式定义一个等价的球面坐标系。

图2.1为球面坐标系与空间直角坐标系。

球面坐标系原点与空间直角坐标系原点重合，以原点 O 至空间点 P 的距离 r 作为第一参数；以 OP 与 OZ 轴的夹角 θ(取小于 π 的值)作为第二参数(在实际工作中常以 $\delta=90°-\theta$ 代

替θ作为第二参数)；第三参数α为ZOX平面与ZOP平面的夹角，自ZOX平面起算右旋为正。

对同一空间点，直角坐标系与其等效的球面坐标系参数间有如下转换关系：

$$\left.\begin{aligned} X &= r\cos\alpha\cos\delta \\ Y &= r\sin\alpha\cos\delta \\ Z &= r\sin\delta \end{aligned}\right\} \tag{2.1}$$

$$\left.\begin{aligned} r &= \sqrt{X^2+Y^2+Z^2} \\ \alpha &= \arctan(Y/X) \\ \delta &= \arctan(Z/\sqrt{X^2+Y^2}) \end{aligned}\right\} \tag{2.2}$$

为了表达地面观测站的位置，需采用固联在地球上、随同地球自转的地球坐标系。它一般以地球质心为坐标原点，也以地球自转轴作为Z轴的正向，与天球坐标系不同的是以地球赤道面与格林威治子午面交线的方向作为X轴的正向。

在大地测量中表示地面点的位置常使用大地坐标系。大地坐标系是通过一个辅助面(参考椭球面)定义的。右手直角坐标系中，可按如下方式定义一个等价的大地坐标系。

大地坐标系与空间直角坐标系的关系可参见图2.2。大地坐标系中的参考面是以长半轴

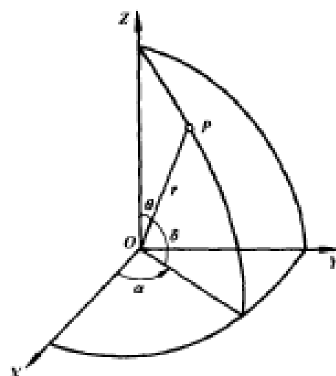


图2.1 球面坐标系与空间直角坐标系

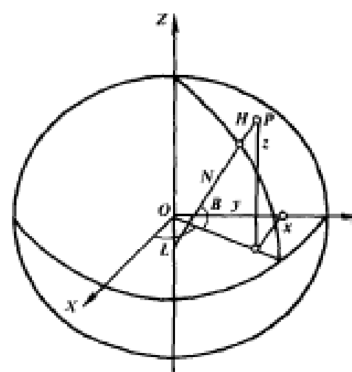


图2.2 大地坐标系与空间直角坐标系

为a、短半轴为b的旋转椭球面。椭球面几何中心与直角坐标系原点重合；短半轴与直角坐标系的Z轴重合。大地坐标系的第一个参数——大地纬度B为过空间点P的椭球面法线与XOY平面的夹角，自XOY面向OZ轴方向量取为正。第二参数——大地经度L为ZOX平面与ZOP平面的夹角，自ZOX平面起算右旋为正。第三个参数——大地高程H为过P点的椭球面法线自椭球面至P点的距离，以远离椭球面中心方向为正。

对同一空间点，直角坐标系与大地坐标系参数间的转换关系如下：

$$\left.\begin{aligned} X &= (N+H)\cos B\cos L \\ Y &= (N+H)\cos B\sin L \\ Z &= [N(1-e^2)+H]\sin B \end{aligned}\right\} \tag{2.3}$$

$$\left.\begin{aligned} L &= \arctan(Y/X) \\ B &= \arctan\{Z(N+H)/[\sqrt{X^2+Y^2}(N(1-e^2)+H)]\} \\ H &= Z/\sin B - N(1-e^2) \end{aligned}\right\} \tag{2.4}$$

式中：$N = a/\sqrt{1-e^2\sin^2 B}$，

N——该点的卯酉圈曲率半径；

$$e^2=(a^2-b^2)/a^2,$$

式中：a、e——分别为该大地坐标系对应参考椭球的长半轴和第一偏心率。

式(2.4)中 B 必须通过迭代的方法求解。

2.1.2 站心赤道直角坐标系与站心地平直角坐标系

使用站心地平坐标系能够比较直观方便地描述卫星与观测站之间的瞬时距离、方位角和高度角，了解卫星在天空中的分布情况。

图 2.3 为站心赤道直角坐标系与站心地平直角坐标系。

如图2.3，P_1 是测站点，O 为球心。以 O 为原点建立球心空间直角坐标系 $O\text{-}XYZ$，以 P_1 为原点建立与 $O\text{-}XYZ$ 相应坐标轴平行的 $P_1\text{-}\overline{XYZ}$ 坐标系叫做站心赤道直角坐标系。

显然，$P_1-\overline{XYZ}$ 同 $O-XYZ$ 坐标系有简单的平移关系。

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\overline{X}\\\overline{Y}\\\overline{Z}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}(N+H)\cos B\cos L\\(N+H)\cos B\sin L\\ [N(1-e^2)+H]\sin B\end{bmatrix} \tag{2.5}$$

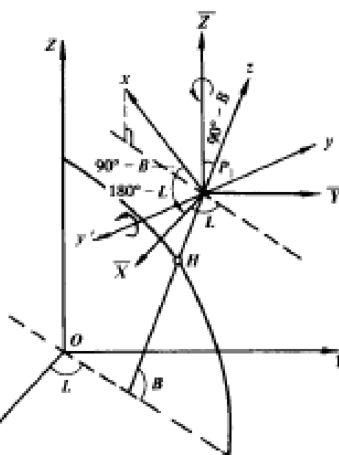


图 2.3　站心赤道与地平直角坐标系

建立以 P_1 为原点的站心左手地平直角坐标系 $P_1\text{-}xyz$：以 P_1 点的法线为 z 轴(指向天顶为正)，以子午线方向为 x 轴(向北为正)，y 轴与 x、z 垂直(向东为正)。此坐标系也称东北天坐标系。通过旋转变换可将地平直角坐标系变换为站心赤道直角坐标系：

先将 y 轴反向得 y'。绕 y' 轴旋转$(90°-B)$，再绕 z 轴旋转$(180°-L)$，即可将 $P_1\text{-}xyz$ 化为 $P_1-\overline{XYZ}$。

$$\begin{bmatrix}\overline{X}\\\overline{Y}\\\overline{Z}\end{bmatrix}_{站赤}=R_z(180°-L)R_y(90°-B)P_y\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}_{地平}=\begin{bmatrix}-\sin B\cos L & -\sin L & \cos B\cos L\\-\sin B\sin L & \cos L & \cos B\sin L\\\cos B & 0 & \sin B\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}_{地平} \tag{2.6}$$

将式(2.6)代入式(2.5)可得出站心左手地平直角坐标系与球心空间直角坐标系的关系式：

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}_{地心}=\begin{bmatrix}-\sin B\cos L & -\sin L & \cos B\cos L\\-\sin B\sin L & \cos L & \cos B\sin L\\\cos B & 0 & \sin B\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}_{地平}+\begin{bmatrix}(N+H)\cos B\cos L\\(N+H)\cos B\sin L\\ [N(1-e^2)+H]\sin B\end{bmatrix} \tag{2.7}$$

类似于球面坐标系和直角坐标系的关系，以测站 P_1 为原点，用测站 P_1 至卫星 s 的距离 r、至卫星的方位角 A、至卫星的高度角 h 可建立与站心地平直角坐标系 P_1-xyz 相等价的站心地平极坐标系 P_1-rAh。其中，方位角 A 为 zox 平面与 zos 的夹角，自 zox 平面起算左旋为

正，高度角 h 为 os 与 xoy 平面的夹角。站心地平极坐标系与站心地平直角坐标系之间的关系可依据式(2.1)、式(2.2)写出：

$$\left.\begin{aligned} x &= r\cos A\cos h \\ y &= r\sin A\cos h \\ z &= r\sin h \end{aligned}\right\} \tag{2.8}$$

$$\left.\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ A &= \arctan(y/x) \\ h &= \arctan(z/\sqrt{x^2 + y^2}) \end{aligned}\right\} \tag{2.9}$$

2.1.3 卫星测量中的常用坐标系

卫星测量是利用空中卫星的位置确定地面观测点的位置。由于卫星围绕地球质心运动，所以卫星测量中通常定义地球质心为坐标系原点，按其三轴指向分别定义天球坐标系和地球坐标系，前者指向天球上的参考点(如春分点)，后者指向地球上的参考点(或方向)。地球坐标系随地球自转而不断地相对于天球坐标系旋转，显然，地面上观测站使用地球坐标系表示其位置更为方便，而不随地球自转一起运动的天体和人造卫星则使用天球坐标系表示其位置更为方便。

(1)瞬时天球坐标系与地球坐标系

卫星定轨与导航定位中，接收机的位置通常是在地球坐标系内表示的，而卫星的位置通常在天球坐标系内表示。应用中需要把表示卫星位置的天球坐标系与表示测站位置的地球坐标系互相变换。由于地球的自转，地球坐标系与天球坐标系之间存在相对运动。如果使两坐标系原点重合，取为地球质心，两坐标系 z 轴重合，取为瞬时地球自转轴，则所定义的瞬时天球坐标系与瞬时地球坐标系具有最简便的变换关系。

瞬时天球坐标系也称真天球(赤道)坐标系：原点位于地球质心，z 轴指向瞬时地球自转方向(真天极)，x 轴指向瞬时春分点(真春分点)，y 轴按构成右手坐标系取向。

瞬时地球坐标系：原点位于地球质心，z 轴指向瞬时地球自转轴方向，x 轴指向瞬时赤道面和包含瞬时地球自转轴与平均天文台赤道参考点的子午面之交点，y 轴构成右手坐标系取向。

瞬时地球坐标系与瞬时天球坐标系的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{et} = R_z(\theta_G)\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{ct} \tag{2.10}$$

下标 et 表示对应 t 时刻的瞬时地球坐标系，ct 表示对应 t 时刻的瞬时天球坐标系。式中 θ_G 为对应于平格林威治子午面的真春分点时角。

图 2.4 为瞬时天球与地球坐标系的关系图。

(2)固定极天球坐标系——平天球坐标系

瞬时天球坐标系，即真天球坐标系可以方便地与地球坐标系相互变换，但由于真天极和真春分点方向不断变化，使瞬时天球坐标系的坐标轴指向不断变化。

由于地球近似为旋转椭球，日、月对地球的引力产生力矩，从而使地球自转轴在空间产生振动，即地球自转轴的方向在天球上缓慢地移动。地球自转轴的变化引起与它垂直的赤道面

的倾斜，从而使春分点（黄道与赤道的交点）变化。这种运动取决于日、月、地球三者的相关位置，其结果使运动十分复杂。可以将运动分解为一个长周期变化和一系列短周期变化的叠加。地球自转轴的长周期变化约25800年绕黄极一周，使春分点产生每年约50.2″的长期变化，称之为日月岁差。一系列短周期变化中幅值最大的约为9″，周期为18.6年，这些短周期变化统称为章动。春分点除因地球自转轴方向改变引起的变化外还因黄道的缓慢变化（行星引力对地球绕日运动轨道的摄动）而变化，称为行星岁差。

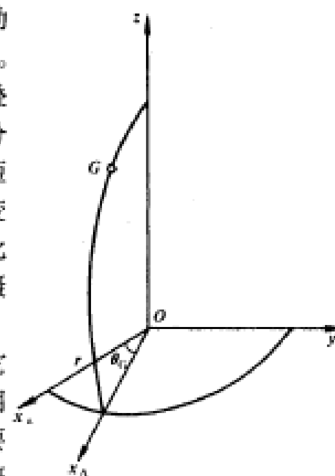


图2.4 瞬时天球与地球坐标系

瞬时天球坐标系的坐标轴指向是不断变化的，也就是说它是一个不断旋转的坐标系。在这样的坐标系中不能直接使用牛顿第二定律，这对研究卫星的运动是很不方便的。因此需要建立一个三轴指向不变的天球坐标系，以便在这个坐标系内研究人造卫星的运动（计算卫星的位置）。而在这个坐标系中所得到的卫星位置又可以方便地变换为瞬时天球坐标系中的值，以便与地球坐标系进行坐标变换。

历元平天球坐标系（简称平天球坐标系）就是三轴指向不变的坐标系。选择某一个历元时刻（即时刻的起算点），以此瞬间的地球自转轴和春分点方向分别扣除此瞬间的章动值作为 z 轴和 x 轴指向，y 轴按构成右手坐标系取向，坐标系原点与真天球坐标系相同。这样的坐标系称为该历元时刻的平天球坐标系。

瞬时天球坐标系与平天球坐标系之间的坐标变换可以通过岁差与章动两次旋转变换来实现。

1）岁差旋转变换

$ZM(t_0)$表示历元J2000.0年（2000年1月1日）平天球坐标系 z 轴指向，$ZM(t)$表示所论历元时刻 t 真天球坐标系 z 轴指向，由于岁差导致地球自转轴的运动使二坐标系 z 轴产生夹角 θ_A；同理，因岁差导致春分点的运动使二坐标系的 x 轴 $XM(t_0)$与 $XM(t)$产生夹角 ζ_A、Z_A。通过旋转变换得到这样两个坐标系间的变换式：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{M(t)} = R_z(-Z_A)R_y(\theta_A)R_z(-\xi_A)\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{M(t_0)} \tag{2.11}$$

式中：ζ_A、θ_A、Z_A——岁差参数。

2）章动旋转变换

在已进行岁差旋转变换的基础上，还要进行章动旋转变换。类似地有

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{c(t)} = R_x(-\varepsilon-\Delta\varepsilon)R_z(-\Delta\Psi)R_x(\varepsilon)\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{M(t_0)} \tag{2.12}$$

式中：ε——所论历元的平黄赤交角；

$\Delta\Psi$、$\Delta\varepsilon$——黄经章动和交角章动参数。

3）固定极地球坐标系——平地球坐标系

地球瞬时自转轴在地球上随时间而变，称为地极移动，简称极移。瞬时地球坐标系是依瞬

时地球自转轴定向的，这将使地球上的测站在该坐标系内不能得到一个确定不变的坐标值。与天球坐标系一样，需要定义一个在地球上稳定不变的坐标系。这一稳定不变的坐标系与瞬时地球坐标系应能方便地进行坐标转换。

1967年国际大地测量与地球物理联合会以1900.00至1905.05年地球自转轴瞬时位置的平均位置作为地球的固定极，称为国际协议原点CIO。定义平地球坐标系的z轴指向国际协议原点。

由于地球不是刚体及其它一些地球物理因素的影响，地球瞬时极相对协议原点（也称平地极）的运动十分复杂，难以用解析式表示它们之间的关系，国际极移局（IPMS）通过观测于事后公布各时刻瞬时极的坐标x_p，y_p。取平地极为原点，x轴指向格林威治平子午圈，即指向经度为0°的方向，y轴指向经度为270°的方向。图2.5为瞬时极与平极关系图。

国际时间局发表的极坐标是根据所属约40个台站的观测结果推算的。初步坐标的间隔为10天，每一期包括2030天刊于该局出版的"B通报"上。间隔为10天的最后坐标刊载于时间局出版的"时间公报"上，约迟一年出版。

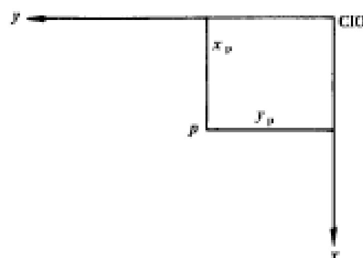


图2.5 瞬时极与平极的关系

平地球坐标系与瞬时地球坐标系的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{em} = R_y(-x''_p)R_x(y''_p)\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{et} \qquad (2.13)$$

式中：下标 em——平地球坐标系；

et——t时的瞬时地球坐标系；

x''_p、y''_p——t时刻以角度表示的极移值。

4）坐标系两种定义方式与协议坐标系

通常，理论上坐标系的定义过程是先选定一个尺度单位（一般采用标准米），然后定义坐标原点的位置和坐标轴的指向。坐标系一经定义，任意几何点都具有一组在该坐标系内的坐标值。反之，一组该坐标系内的坐标值就定义了一个几何点。实际应用中，在已知若干测站点的坐标值后，通过观测又可反过来定义该坐标系。可以将前一种方式称为坐标系的理论定义。而由一系列已知测站点所定义的坐标系称为协议坐标系。在点位坐标值不存在误差的情况下，这两种方式对坐标系的定义是一致的。

事实上点位的坐标值通常是通过一定的测量手段得到的，它们总是含有误差的。由它们反过来定义的协议坐标系与原来的理论定义的坐标系会有所不同，尤其是所采用的已知点坐标值的个数多于坐标系定义所必需的参数时，只能通过平差的方法求得协议坐标系的有关参数。凡依据这些已知点位测定的其它点位的坐标值均属于这一协议坐标系而不属于理论定义的坐标系。例如，所测定的卫星轨道及利用卫星轨道所测定的点位均属于卫星跟踪站及其坐标值所定义的协议坐标系。GPS所采用的坐标系统是测轨跟踪站及其坐标值所定义的协议坐标系。由于可以采用激光测卫、激光测月和甚长干涉等高精度测量手段，可以使GPS跟踪站的坐标误差很小（分米级），即这种协议坐标系与理论定义的坐标系偏差不大。

GPS卫星位置采用WGS—84大地坐标系。

2.2 WGS—84坐标系和我国大地坐标系

GPS单点定位的坐标以及相对定位中解算的基线向量属于WGS—84大地坐标系，因为

GPS 卫星星历是以 WGS—84 坐标系为根据而建立的，而实用的测量成果往往是属于某一国家坐标系或地方坐标系（也叫局部参考坐标系），因而必须进行坐标转换。下面先介绍 WGS—84 坐标系及国家大地坐标系有关常识，然后介绍坐标系之间的转换方法。

2.2.1 WGS—84 大地坐标系

WGS—84 大地坐标系的几何定义是：原点位于地球质心，Z 轴指向 BIH1984.0 定义的协议地球极（CTP）方向，X 轴指向 BIH1984.0 的零子午面和 CTP 赤道的交点，Y 轴与 Z、X 轴构成右手坐标系。对应于 WGS—84 大地坐标系有 WGS—84 椭球。

WGS—84 椭球及有关常数采用国际大地测量（IAG）和地球物理联合会（IUGG）第 17 届大会对大地测量常数的推荐值，四个基本常数为：

（1）长半轴　$a = 6378137 \pm 2\text{m}$；

（2）地心引力常数（含大气层）$GM = (3986005 \pm 0.6) \times 10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2})$；

（3）正常化二阶带谐系数 $\overline{C}_{2.0} = -484.16685 \times 10^{-6} \pm 1.30 \times 10^{-9}$；

（4）地球自转角速度 $\omega = 7292115 \times 10^{-11} \pm 0.1500 \times 10^{-11} (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$。

利用以上 4 个基本常数，可以计算出其它的椭球常数，如第一偏心率 e、第二偏心率 e' 和扁率 α 分别为：

$$e^2 = 0.00669437999013$$

$$e'^2 = 0.00673949674227$$

$$\alpha = 1/298.257223563$$

而某点大地水准面高 N 等于由 GPS 定位测定的该点大地高 H 减该点的正高 $H_{正}$。N 值可以利用球谐函数展开式和一套 $n = m = 180$ 阶项的 WGS—84 地球重力场模型系数计算得出；也可以用特殊的数学方法（如曲面拟合法等）精确计算局部大地水准面高 N。一旦大地水准面高 N 确定之后，便可利用 $H_{正} = H - N$ 计算各 GPS 点的正高 $H_{正}$。

2.2.2 国家大地坐标系

我国目前常用的两个国家大地坐标系是 1954 年北京坐标系和 1980 年国家大地坐标系。

（1）1954 北京坐标系

20 世纪 50 年代，在我国天文大地网建立初期，鉴于当时的历史条件，采用了克拉索夫斯基椭球元素（$a = 6378245\text{m}, \alpha = 1/298.3$），并与前苏联 1942 年普尔科沃坐标系进行联测，通过计算建立了我国大地坐标系，定名为 1954 年北京坐标系。

1954 年北京坐标系和前苏联 1942 年普尔科沃坐标系有一定的关系（椭球参数和大地原点一致），但又不完全是前苏联 1942 年普尔科沃坐标系。如大地点高程是以 1956 年青岛验潮站求出的黄海平均海水面为基准确立的，高程异常是以前苏联 1955 年大地水准面重新平差结果为起算值，按我国天文水准路线推算出来的。

几十年来，我国按 1954 年北京坐标系完成了大量的测绘工作，在该坐标系上，实施了天文大地网局部平差，通过高斯—克吕格投影，得到点的平面坐标，绘制了各种比例尺的地形图。这一坐标系在我国经济建设和国防建设的各个领域中发挥了巨大的作用。该坐标系在今后相当长一个时期内，在一些部门还将继续使用。

（2）1980 年国家大地坐标系

为了进行全国天文大地网整体平差，采用了新的椭球元素并进行了新的定位与定向，1978

年以后，建立了1980年国家大地坐标系。

1980年国家大地坐标系的大地原点设在我国中部——陕西省泾阳县永乐镇。

该坐标系是参心坐标系。椭球短轴 Z 轴平行于地球地心指向1968.0地极原点(JYD)的方向；大地起始子午面平行于格林尼治平均天文子午面，X 轴在大地起始子午面内与 Z 轴垂直指向经度零方向；Y 轴与 ZOX 面垂直并构成右手坐标系。椭球(IAG—75)参数采用1975年国际大地测量与地球物理联合会第十六届大会的推荐值，四个基本常数是：

$$a = 6378140 \pm 5(\mathrm{m})$$

$$GM = (3986005 \pm 3) \times 10^{8}(\mathrm{m}^{3} \cdot \mathrm{s}^{-2})$$

$$J_2 = (108263 \pm 1) \times 10^{-8}$$

$$\omega = 7292115 \times 10^{-11}(\mathrm{rad} \cdot \mathrm{s}^{-1})$$

由以上四个参数求出：

$$a = 6378140\mathrm{m}$$

$$\alpha = 1/298.257$$

椭球定位时按我国范围内高程异常值平方和最小为原则求解参数。高程系统基准是1956年青岛验潮站求出的黄海平均海水面。

1980年国家大地坐标系建立后，实施了全国天文大地网整体平差。提供了属于1980年国家大地坐标系的大地点成果。这种成果与原大地点局部平差成果二者属于两个不同的参心坐标系，这给实际的使用带来一定问题。实用部门和单位的大量测量成果都是以1954北京坐标系为参考的，因而也有的部门和单位将1980年国家大地坐标系的空间直角坐标经三个平移参数平移变换至克氏椭球中心，椭球参数保持与1954年北京坐标系相同而建立所谓新1954年北京坐标系，这样新1954坐标系与原1954坐标系坐标接近，但其精度和1980年国家大地坐标系完全一样。表2.1为我国参心坐标系的情况。

我国参心坐标系简表　　　　表2.1

坐标系名称	地球椭球 a(m) α	大地原点 B_0 L_0	定位 ξ_0	η_0	N_0 (m)	备注
1954年北京坐标系	克拉索夫斯基 6378245 1:298.3					
1980年国家大地坐标系	IAG—75 6378140 1:298.257	陕西永乐镇 34°32′ 108°46′	−1.9″	−1.6″	−14.2	
1960年南京坐标系	海福特 6378388 1:297.0	大石桥天文观测所 32°03′ 118°46′				美国1:250000卫星图采用
长春坐标系	白塞尔 6377397.155 1:299.1528	饮喜岭 43°49′ 125°18′				日伪时期东北地区采用
台湾坐标系	1967年国际椭球 6378160 1:298.247	台湾虎子山地理中心碑 23°58′32.34″ 120°58′25.975″				原点设在南投县埔里镇东北郊的虎子山山腰

2.2.3 地方独立坐标系

我国许多城市和矿区基于实用、方便的目的，将地方独立测量控制网建立在当地的平均海拔高程面上，并以当地子午线作为中央子午线进行高斯投影求得平面坐标。仔细地分析研究这些地方独立测量控制网，可以发现，这些网都有自己的原点和自己的定向，也就是说，这些控制网都是以地方独立坐标系为参考的。而地方独立坐标系则隐含着一个与当地平均海拔高程面对应的参考椭球。该椭球的中心、轴向和扁率与国家参考椭球相同，其长半径则有一改正量。我们将此参考椭球称为“地方参考椭球”。下面讨论地方参考椭球长半径与国家参考椭球长半径的关系。

设某地方独立坐标系的参考椭球面为海拔高程为 H 的曲面，该地方的大地水准面差距为 ζ，则该曲面离国家参考椭球的高度为：

$$dN = H + \zeta \tag{2.14}$$

根据假定，两椭球的中心一致、轴向一致、扁率相等，仅长半径有一差值 da，即有：

$$dN/N = da/a \tag{2.15}$$

即：

$$da = (a/N)dN$$

式中：a——国家参考椭球长半径；

N——相应于该椭球的地方独立控制网原点的卯酉圈曲率半径。

这样，使得地方参考椭球的长半径 a_L 为：

$$a_L = a + da$$

根据假定有：

$$\alpha_L = \alpha$$

式中：α_L、α——分别为地方参考椭球和国家参考椭球的扁率。

于是，地方参考椭球和国家参考椭球的关系可以表述为：

中心一致：$$X_0 = 0, Y_0 = 0, Z_0 = 0; \tag{2.16}$$

轴向一致：$$\varepsilon_x = 0, \varepsilon_y = 0, \varepsilon_z = 0; \tag{2.17}$$

扁率相等：$$\alpha_L = \alpha \tag{2.18}$$

长半径有一增量：$$da = (dN/N)a \tag{2.19}$$

$$a_L = a + da$$

2.3 坐标系统之间的转换

实际应用中需要将 GPS 点的 WGS—84 坐标转换为地面网的坐标。因此，需要讨论坐标系统之间的转换问题。坐标系统之间的转换包括不同参心大地坐标系统之间的转换、参心大地坐标系与地心大地坐标系之间的转换以及大地坐标与高斯平面坐标之间的转换等。

2.3.1 不同空间直角坐标系统之间的转换

进行两个不同空间直角坐标系统之间的坐标转换，需要求出坐标系统之间的转换参数。转换参数一般是利用重合点的两套坐标值通过一定的数学模型进行计算。当重合点数为三个以上时，可以采用布尔萨(Bursa)7 参数法进行转换。

设 X_{Di}和 X_{Gi}分别为地面网点和 GPS 网点的参心和地心坐标向量。由布尔萨模型可知：

$$X_{D_i} = \Delta X + (1+k)R(\varepsilon_z)R(\varepsilon_y)R(\varepsilon_x)X_{Gi} \tag{2.20}$$

式中：$X_{D_i} = (X_{D_i}, Y_{D_i}, Z_{D_i})$，$X_{G_i} = (X_{G_i}, Y_{G_i}, Z_{G_i})$，$\Delta X = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$是平移参数矩阵；

k——尺度变化参数。

$$R(\varepsilon_z) = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_z & \sin\varepsilon_z & 0 \\ -\sin\varepsilon_z & \cos\varepsilon_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R(\varepsilon_y) = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_y & 0 & -\sin\varepsilon_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varepsilon_y & 0 & \cos\varepsilon_y \end{bmatrix}$$

$$R(\varepsilon_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varepsilon_x & \sin\varepsilon_x \\ 0 & -\sin\varepsilon_x & \cos\varepsilon_x \end{bmatrix}$$ 为旋转参数矩阵，

通常将 ΔX、ΔY、ΔZ、k、ε_x、ε_y、ε_z 称为坐系间的转换参数。

为了简化计算，当 k、ε_x、ε_y、ε_z 为微小量时，忽略其间的互乘项，且 $\cos\varepsilon \approx 1$，$\sin\varepsilon \approx \varepsilon$，则上述模型变为：

$$\begin{bmatrix} X_{D_i} \\ Y_{D_i} \\ Z_{D_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1+k)\begin{bmatrix} X_{G_i} \\ Y_{G_i} \\ Z_{G_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 0 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_{G_i} \\ Y_{G_i} \\ Z_{G_i} \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

令 $R = (\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z \ k \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z)^{\mathrm{T}}$，

$$C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{G_i} & 0 & -Z_{G_i} & Y_{G_i} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{G_i} & Z_{G_i} & 0 & -X_{G_i} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{G_i} & -Y_{G_i} & X_{G_i} & 0 \end{bmatrix}$$

上式可简写为：

$$X_{D_i} = X_{Q_i} + C_i R \tag{2.22}$$

通过上述模型，利用重合点的两套坐标值 X_{D_i}和 X_{G_i}($i = 1, 2, \cdots N$)，采取平差的方法可以求得转换参数。求得转换参数后，再利用上述模型对其它控制点进行坐标转换。对于重合点来说，转换后的坐标值与已知值有一差值。其差值的大小反映转换后坐标的精度。其精度与被转换的坐标精度有关，也与转换参数的精度有关。

实际应用中对于局部 GPS 网还可应用基线向量求解转换参数的方法。这种方法是先求出各重合点相对地面网原点的基线向量，然后利用基线向量求定转换参数。具体做法如下：

对于地面网原点，由式(2.20)有：

$$X_{D_0} = \Delta X + (1+k)R(\varepsilon_z)R(\varepsilon_y)R(\varepsilon_x)X_{G_0} \tag{2.23}$$

将式(2.20)减去式(2.23)得：

$$X_{D_i} = X_{D_0} + (1+k)R(\varepsilon_z)R(\varepsilon_y)R(\varepsilon_x)(X_{G_i} - X_{G_0}) \tag{2.24}$$

可以假定 $i = 1$ 为原点。式(2.24)实际上是以 1 点为原点，其余点与原点的坐标差——基线向量为已知值的坐标转换式。利用此式可列出误差方程式，求转换参数(只有三个旋转角 ε_x、ε_y、ε_z 和尺度变化参数 k)。

实际数据计算表明，第二种方法的精度优于第一种方法。

2.3.2 不同大地坐标系的换算

不同大地坐标系的换算，除了上述七个参数外，还应增加两个转换参数，这就是两种大地坐标系所对应的地球椭球参数($da, d\alpha$)。不同大地坐标系的换算公式又称大地坐标微分公式或变换椭球微分公式。这部分公式比较复杂，可参见有关大地测量教科书。

2.3.3 大地坐标(B, L)与高斯平面坐标(x, y)之间的转换

大地坐标与高斯平面坐标之间的转换，其具体内容可参照有关控制测量教科书，这里仅列出公式部分。

当已知一点的大地经度 L、大地纬度 B，可按下式计算该点在高斯—克吕格投影平面直角坐标系中的坐标：

$$\begin{cases} x = X_0 + Nt\cos^2 B\dfrac{l^2}{\rho^2}\left[0.5 + \dfrac{1}{24}(5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4)\cos^2 B\dfrac{l^2}{\rho^2} + \dfrac{1}{720}(61 - 58t^2 + t^4)\cos^4 B\dfrac{l^4}{\rho^4}\right] \\ y = N\cos B\dfrac{l}{\rho}\left[1 + \dfrac{1}{6}(1 - t^2 + \eta^2)\cos^2 B\dfrac{l^2}{\rho^2} + \dfrac{1}{120}(5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 t^2)\cos^4 B\dfrac{l^4}{\rho^4}\right] \end{cases} \tag{2.25}$$

式中：X_0——自赤道量至该点的子午线弧长，

$$X_0 = 111134.8611B^\circ - \sin B\cos B(32005.7799 + 133.9238\sin^2 B + 0.6973\sin^4 B + 0.0039\sin^6 B) \quad \text{(克拉索夫斯椭球)}; \tag{2.26}$$

$$X_0 = 111133.0047B^\circ - \sin B\cos B(32009.8575 + 133.9602\sin^2 B + 0.6976\sin^4 B + 0.0039\sin^6 B) \quad \text{(IAG—75 椭球)}; \tag{2.27}$$

N——卯酉圈曲率半径；

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2\sin^2 B}}$$

l——计算点大地经度与投影带中央子午线经度之差，即：

$$\left.\begin{aligned} l &= L - L_0 \\ \eta^2 &= e'^2\cos^2 B \\ t &= \tan B \end{aligned}\right\} \tag{2.28}$$

对于克拉索夫斯基椭球和 IAG—75 椭球，其有关椭球参数如表 2.2 所示。

地球椭球的有关参数 表 2.2

参　数	克拉索夫斯基椭球	IAG—75 椭球
a	6378245.0m	6378140m
b	6356863.0188m	6356755.2881m
α	1/298.3	1/298.257
e^2	0.00669 34216 230	0.00669 43849 996
e'^2	0.00673 85254 147	0.00673 95018 195
ρ°	57.29577 95130 82321°	
ρ'	3437.74677 07849 3917'	
ρ''	206264.80624 70963 55"	

按式(2.25)计算出的(x、y)值，称为“自然值”。为了避免 y 值出现负号，我国规定将 y 值加上 500km；为了标明点的带号，又规定在其前面冠以带号，这种坐标称为“通用坐标”。例如成果表中 $y = 19276299.7$m，实际上它是第 19 带，$y = -223700.3$m。

由一点的大地经、纬度(L、B)求(x、y)，称为高斯投影正算；而由(x、y)求(L、B)称为反算。其计算公式为：

$$\left.\begin{aligned} B &= B_f - \frac{\rho t_f}{2M_f}y\left(\frac{y}{N_f}\right)\left[1 - \frac{1}{12}(5 + 3t_f^2 + \eta_f^2 - 9\eta_f^2t_f^2)\left(\frac{y}{N_f}\right)^2\right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{360}(61 + 90t_f^2 + 45t_f^4)\left(\frac{y}{N_f}\right)^4\right] \\ l &= \frac{\rho}{\cos B_f}\left(\frac{y}{N_f}\right)\left[1 - \frac{1}{6}(1 + 2t_f^2 + \eta_f^2)\left(\frac{y}{N_f}\right)^2\right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{120}(5 + 28t_f^2 + 24t_f^4 + 6\eta_f^2 + 8\eta_f^2t_f^2)\left(\frac{y}{N_f}\right)^4\right] \\ l &= L_0 + L \end{aligned}\right\} \tag{2.29}$$

式中：L_0——投影带中央子午线经度；

B_f——底点纬度，可按以下公式迭代计算：

对于克拉索夫斯椭球，有：

$$\begin{cases} B_0 = x/111134.8611 \\ B_f = B_0 + \sin B_0\cos B_0(32005.7799 + 133.9238\sin^2 B_0 \\ \qquad + 0.6973\sin^4 B_0 + 0.0039\sin^6 B_0)/111134.8611 \end{cases} \tag{2.30}$$

对于 IAG—75 椭球，有：

$$\begin{cases} B_f = B_0 + \sin B_0\cos B_0(32009.8575 + 133.9602\sin^2 B_0 \\ \qquad + 0.6976\sin^4 B_0 + 0.0039\sin^6 B_0)/111133.0047 \\ B_0 = x/111133.0047 \end{cases} \tag{2.31}$$

式中：N_f——对应于 B_f 的卯酉圈曲率半径；

M_f——对应于 B_f 的子午圈曲率半径。

$$M_f = \frac{N_f}{1 + e'^2\cos^2 B_f} \tag{2.32}$$

t_f 和 η_f 值的计算式如下：

$$\begin{cases} t_f = \tan B_f \\ \eta_f = e'\cos B_f \end{cases} \tag{2.33}$$

2.4 时间系统

在 GPS 卫星定位中，时间系统有着十分重要的意义。作为观测目标的 GPS 卫星以每秒几公里的速度运动，对观测者而言，卫星的位置(方向、距离、高度)和速度都在不断地迅速变化。因此，在卫星测量中，在由跟踪站对卫星进行定轨时，在给出卫星位置的同时，必须给出对应的瞬间时刻。当要求 GPS 卫星位置的误差小于 1cm 时，相应的时刻误差应小于 2.6μs。在 GPS 接收机接收并处理 GPS 卫星发射的信号时，测定接收机至卫星之间的信号传播时间，再乘以光速换算成距离，进而确定观测站的位置。要准确地测定观测站至卫星的距离，必须精确地测定信号的传播时间。如果要求距离误差小于 1cm 时，则信号传播时间的测定误差应小于

0.03ns。因此，任何一个观测量都必须给定取得该观测量的时刻。为了保证观测量的精度，对观测时刻要有相应的精度要求。

时间系统与坐标系统一样，也应有其尺度（时间单位）与原点（历元）。只有把尺度与原点结合起来，才能给出时刻的概念。

理论上，任何一个周期运动，只要它的运动是连续的，其周期是恒定的，并且是可观测和用实验复现的，都可以作为时间尺度（单位）。实际上，我们所能得到的时间尺度只能在一定的精度上满足这一要求。随着观测技术的发展和更加稳定的周期运动的发现将不断接近这一理论要求。实际应用中，由于所选用的周期运动现象不同，便产生了不同的时间系统。

2.4.1 恒星时 ST(Sidereal Time)

以春分点为参考点，由春分点的周日视运动所定义的时间系统为恒星时系统。其时间尺度为：春分点连续两次经过本地子午圈的时间间隔为一恒星日，一恒星日分为 24 个恒星时。恒星时以春分点通过本地上子午圈时刻（上中天）为起算原点，所以恒星时在数值上等于春分点相对于本地子午圈的时角。恒星时具有地方性，同一瞬间对不同测站的恒星时是不同的，所以恒星时也称为地方恒星时。

恒星时是以地球自转为基础的。由于岁差、章动的影响，地球自转轴在空间的指向是变化的，春分点在天球上的位置并不固定。对于同一历元所相应的真天极和平天极，有真春分点和平春分点之分。因此，相应的恒星时也有真恒星时和平恒星时之分。恒星时在天文学中有着广泛的应用。

2.4.2 平太阳时 MT(Mean Solar Time)

由于地球围绕太阳的公转的轨道为一椭圆，太阳的视运动速度是不均匀的。假设一个平太阳以真太阳周年运动的平均速度在天球赤道上作周年视运动，其周期与真太阳一致。则以平太阳为参考点，由平太阳的周日视运动所定义的时间系统为平太阳时系统。其时间尺度为：平太阳连续两次经过本地子午圈的时间间隔为一平太阳日，一平太阳日分为 24 平太阳时。同样，平太阳时也具有地方性，故常称其为地方平太阳时或地方时。

2.4.3 世界时 UT(Universal Time)

以平子夜为零时起算的格林威治平太阳时定义为世界时 UT。世界时与平太阳时的尺度相同，但起算点不同。1956 年以前，秒被定义为一个平太阳日的 1/86400。这是以地球自转这一周期运动作为基础的时间尺度。由于地球自转的不稳定性，在 UT 中加入极移改正即得到 UT1。由于高精度石英钟的普遍采用以及观测精度的提高，人们发现地球自转周期存在着季节变化、长期变化及其他不规则变化。UT1 加上地球自转速度季节性变化后为 UT2。1956 年国际上采用新的秒长定义。即历书时秒等于回归年长度的 1/31556925.9747。就时间尺度而言，世界时已被历书时 ET 所代替，之后，又于 1976 年为原子时所取代。但是 UT1 在卫星测量中仍被广泛使用，只是它不再作为时间尺度，因为它在数值上表示了地球自转相对于恒星的角位置，因而可用于天球坐标与地球坐标系之间的转换计算。

2.4.4 原子时 ATI(International Atomic Time)

随着对时间准确度和稳定度的要求不断提高，以地球自转为基础的世界时系统难以满足

要求。20世纪50年代，便开始建立以物质内部原子运动的特征为基础的原子时系统。原子时的秒长被定义为铯原子 C_s^{133} 基态的两个超精细能级间跃迁辐射振荡9192631170周所持续的时间。原子时的起点，按国际协定取为1958年1月1日0时0秒(UT2)(事后发现在这一瞬间ATI与UT2相差0.0039秒)。就目前的观测水平而言这一时间尺度是均匀的(所依据的周期运动具有稳定的周期)。这一时间尺度被广泛地应用于动力学作为时间单位，其中包括卫星动力学。

2.4.5 协调世界时 UTC(Coordinated Universal Time)

目前许多实际应用部门仍然要求时间系统接近世界时UT，协调世界时UTC即是一种办法。它采用原子时作为秒长，但因原子时比世界时每年快约1秒，两者之差逐年积累，便采用跳秒的方法使协调时与世界时的时刻相接近，其差不超过1秒。这样UTC既保持时间尺度的均匀性，又能近似地反映地球自转的变化。按国际无线电咨询委员会(CCIR)通过的关于UTC的修正案，从1972年1月1日起UTC与UT1之间的差值最大可以达到±0.9秒，超过或接近时以跳秒补偿，跳秒一般安排在每年12月末或6月末。具体日期由国际时间局安排并通告。为了使UT1的用户能得到精度较高的UT1时刻，时间服务部门在发播UTC时号的同时，还给出了与UTC差值的信息(目前我国的授时部门仍然在直接发播的UT1时号)。这样可以方便地由协调时UTC得到世界时UT1

$$T_{UT1} = T_{UTC} + \Delta T \tag{2.34}$$

式中：$\Delta T = T_{UT1} - T_{UTC}$，即为所播发的差值。

2.4.6 GPS时间系统

GPS是测时测距系统。时间在GPS测量中是一个基本的观测量。卫星的信号、卫星的运动、卫星的坐标都与时间密切相关。对时间的要求既要稳定又要连续。为此，GPS系统中卫星钟和接收机钟均采用稳定而连续的GPS时间系统。

GPS时间系统采用原子时ATI秒长作为时间基准，但时间起算的原点定义在1980年1月6日UTC 0时。启动后不跳秒，保持时间的连续。以后随着时间的积累，GPS时与UTC时的整秒差以及秒以下的差异通过时间服务部门定期公布(至1995年相差达10s)。卫星播发的卫星钟差也是相对GPS时间系统的钟差，在利用GPS直接进行时间校对时应注意到这一问题。

GPS时与ATI时在任一瞬间均有一常量偏差：

$$T_{ATI} - T_{GPS} = 19(s)$$

GPS时间系统与各种时间系统的关系见图2.6所示。

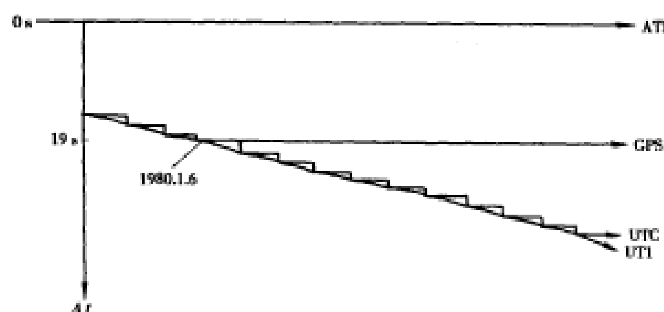


图2.6 GPS时间系统与各种时间系统

2.5 卫星的无摄运动

人造地球卫星绕地球的运动状态取决于它所受到的各种作用力。这些作用力主要有：地球对卫星的引力，太阳、月亮对卫星的引力，大气阻力，太阳光压，地球潮汐力等。在这些作用力中，地球引力是主要的。如果将地球引力视为1，则其它作用力均小于 10^{-5}。在这多种力的作用下，卫星在空间运行的轨迹极其复杂，难以用简单而精确的数学模型表达。为了研究卫星运动的基本规律，可将卫星受到的作用力分为两类，第一类是地球质心引力，即将地球看作密度均匀或由无限多密度均匀的同心球层所构成的圆球，可以证明它对球外一点的引力等效于质量集中于球心的质点所产生的引力，这种引力叫做中心引力。然而地球实际为非球形对称（近似为椭球体），这种非球形对称的地球引力场便对卫星产生非中心的引力，加上日、月引力，大气阻力，太阳光压，地球潮汐力等便产生了第二类名为摄动力的非中心引力。摄动力与中心引力相比，仅为 10^{-3}量级。

忽略所有的摄动力，仅考虑地球质心引力的情况下来研究卫星相对于地球的运动，在天体力学中，称之为二体问题。二体问题下的卫星运动虽然是一种近似描述，但能得到卫星运动的严密分析解，从而可以在此基础上再加上摄动力来推求卫星受摄运动的轨道。在摄动力的作用下，卫星的运动将偏离二体问题的运动轨道，常将此称为考虑了摄动力作用的受摄运动。

GPS 卫星离地面高度为两万多公里。利用 GPS 卫星进行定位测量，要达到 10^{-7}的相对定位精度，要求 GPS 卫星的定轨精度应能保证达到 2m 以上的精度。在这种情况下，任何摄动力的模型必须小于 2m 级的精度。目前，GPS 卫星的广播星历轨道误差约为 30m。广播星历 30m 的误差将以 1.2×10^{-6}的误差引入基线。因此，广播星历误差构成了 GPS 相对定位的主要误差来源。若要进行高精度的相对定位，在实际应用中必须研究 GPS 卫星的运行规律，改进 GPS 卫星的定轨精度。有关卫星轨道误差对 GPS 定位精度的影响，将在后文详细介绍。

2.5.1 卫星运动的轨道参数

仅考虑地球质心引力作用的卫星运动称为无摄运动。在研究卫星的无摄运动中，将地球和卫星看作两个质点，在二体问题中研究两个质点在万有引力作用下的运动。卫星 S 围绕地球质心 O 的运动关系如图 2.7 所示。

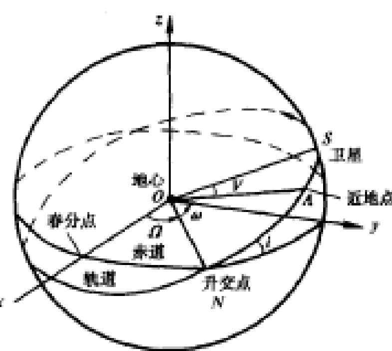


图 2.7 卫星轨道参数

由开普勒定律可知，卫星运行的轨道是通过地心平面上的一个椭圆，且地心是椭圆的一个焦点。确定椭圆形状和大小需要两个参数，即椭圆的长半径 a 及其偏心率 e（或椭圆的短半径 b）。另外，为了确定任意时刻卫星在轨道平面上的位置，还需要一个参数，一般取真近点角 v（在轨道平面上卫星与近地点之间的地心角距）。

参数 a、e 和 v，唯一地确定了卫星轨道的形状、大小以及卫星在轨道上的瞬时位置。但是，这时卫星轨道平面与地球体在空间上的相对位置和方向还无法确定。根据开普勒第一定律，轨道椭圆的一个焦点与地球的质心相重合，所以，为了确定该椭圆轨道在天球坐标系中的方向，尚需三个参数，它们是：

Ω——升交点的赤径，即在地球赤道平面上，升交点 N 与春分点 r 之间的地心夹角。升交点 N 即当卫星由南向北运动时，其轨道与地球赤道面的交点。

i——轨道面的倾角，即卫星轨道平面与地球赤道面之间的夹角。

Ω、i 两个参数确定了卫星轨道平面与地球体之间的相对定向。

ω——近地点角距，即在轨道平面上近地点 A 与升交点 N 之间的地心角距。这一参数表达了开普勒椭圆在轨道平面上的定向。

卫星的无摄运动，一般可通过一组适宜的参数来描述。但是，这组参数的选择并不是惟一的。应用广泛的参数(a、e、v、Ω、i、ω)，称为开普勒轨道参数，或称轨道根数。

用上述6个参数描述卫星的轨道运动，一般来说是合理而必要的。但在特殊情况下，例如当卫星轨道为一圆形轨道，即 $e=0$ 时，参数 ω 和 v 便失去意义。对于 GPS 卫星来说 $e\approx0.01$，所以采用上述6个轨道参数是合适的。至于参数 a,e,Ω,i,ω 的大小，则是由卫星的发射条件决定。

2.5.2 二体问题的运动方程

研究卫星 S 绕地球 O 的运动，主要是研究卫星运动状态随时间的变化规律。根据牛顿定律可以很方便地得到二体问题的卫星运动方程。

图2.7中，O 为地球质心，S 为卫星，设 m_e 和 m_s 分别为地球和卫星的质量，$r=OS$ 为卫星的位置矢量。根据万有引力定律，O 与 S 之间的引力大小为 Gm_em_s/r^2。二体问题中，地球 O 和卫星 S 两个质点均受到万有引力的作用，它们的大小相等方向相反。

用 F_S、F_e 分别表示卫星与地球所受到的引力作用力，则有

$$\begin{aligned} F_s &= -(Gm_em_s/r^2)\cdot r^o \\ F_e &= +(Gm_em_s/r^2)\cdot r^o \end{aligned} \tag{2.35}$$

式中：$G=(6672\pm4.1)\times10^{-14}\mathrm{Nm^2kg^{-2}}$。

设 a_s、a_e 为 S、O 在万有引力作用下所产生的加速度，则根据牛顿第二定律，可得卫星与地球的运动方程：

$$\begin{aligned} a_s &= -(Gm_e/r^2)\cdot r^o \\ a_e &= +(Gm_s/r^2)\cdot r^o \end{aligned} \tag{2.36}$$

因牛顿第二定律只适用于惯性坐标系，故式(2.36)为 O 和 S 在某一惯性坐标系内的运动方程。若要讨论卫星 S 相对于地球质心 O 的运动，必须将坐标系原点移至地球质心，并设 a 为卫星 S 相对于 O 的加速度，则，

$$a = a_s - a_e = -[G(m_e+m_s)/r^2]\cdot r^o \tag{2.37}$$

上式即为卫星 S 相对于地球质心 O 的运动方程。

由于地球质量(5.97×10^{21}t)远远大于卫星质量，通常略去卫星质量 m 项，式(2.37)可写成：

$$a = -(Gm_e/r^2)\cdot r^o \tag{2.38}$$

通常取 $\mu=Gm_e$ 为地球引力常数，为便于计算，选取地球赤道半径 $a=6378140$m 作为长度单位，时间单位取为806.81166s，地球引力常数 $\mu=1$。这样的单位称为人卫单位。此时式(2.38)可写为：

$$a = -1/r^2\cdot r^o \tag{2.39}$$

设以 O 为原点的直角坐标系为 $O\text{-}XYZ$，S 点的坐标为 (X, Y, Z)，则卫星 S 的地心向径 $r = (X, Y, Z)$，加速度 $a = (\ddot{X}, \ddot{Y}, \ddot{Z})$，代入式(2.38)式即得：

$$\left.\begin{aligned} \ddot{X} &= -\mu X/r^3 \\ \ddot{Y} &= -\mu Y/r^3 \\ \ddot{Z} &= -\mu Z/r^3 \end{aligned}\right\} \tag{2.40}$$

式中：$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$

式(2.40)就是卫星大地测量中常用的在地心直角坐标系中二体问题分量形式的微分方程。它是三个二阶非线性常微分方程组。

解算二体问题微分方程，必须找出包含有六个相互独立的积分常数，这六个积分常数可以用上述六个轨道根数代替。其解的一般形式为：

$$\left.\begin{aligned} r &= g(a, e, i, \Omega, \omega, \tau, t) \\ \mathrm{d}r/\mathrm{d}t &= \dot{g}(a, e, i, \Omega, \omega, \tau, t) \end{aligned}\right\} \tag{2.41}$$

从式(2.41)可以看出，在二体问题情况下，给定六个轨道根数，即可确定任意时刻 t 的卫星位置及其运动速度。

2.5.3 二体问题微分方程的解

二体问题微分方程的解是与轨道根数有关的卫星运动的状态方程，即卫星位置、速度与轨道根数和时间的关系式。

(1)卫星运动的轨道平面方程

直接由微分方程(2.40)求积分，可以得到卫星运动的轨道平面方程：

$$AX + BY + CZ = 0 \tag{2.42}$$

式中：X、Y、Z——卫星在地心天球直角坐标系中的坐标，而 A、B、C 则是三个待定的积分常数。令 $h = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$，可以证明：

$$\left.\begin{aligned} A &= h\sin\Omega\sin i \\ B &= -h\cos\Omega\sin i \\ C &= h\cos i \end{aligned}\right\} \tag{2.43}$$

i、Ω 的意义同前述。h 的意义为卫星 S 对地心 O 的向径在单位时间内所扫过的面积（又叫面积速度）的二倍，可以证明 $h^2 = \mu a(1 - e^2)$。

(2)卫星运动的轨道方程

二体问题微分方程解的另外三个积分常数可在轨道平面上进行进一步轨道积分确定。为此，先建立轨道平面坐标系 $O - xy$，原点 O 仍在地球质心，x 轴指向升交点 N，自 x 轴卫星运动方向旋转 90 度为 y 轴。在这一平面坐标系中建立二体运动微分方程（类似式(2.40)的前两式），通过解算可以得到其通解，即卫星运动的轨道方程：

$$r = (h^2/\mu)/[1 + e\cos(\theta - \omega)] \tag{2.44}$$

式中：e、ω——新的积分常数；

θ——从 x 轴至卫星向径 r 的角度。

由于 $\theta = \omega + V$，$h^2 = \mu a(1 - e^2)$，式(2.44)还可以用真近点角 V 表示：

$$r = a(1 - e^2)/(1 + e\cos V) \tag{2.45}$$

式(2.45)就是用真近点角 V 表示的轨道方程。

由二体运动的微分方程还可求出常用的表示卫星运动速度 U 的活力积分：

$$U^2 = \mu(2/r - 1/a) \tag{2.46}$$

至此，已导出了五个积分常数（i,Ω,a,e,ω）。轨道方程中的 θ 或 V 是与时间 t 有关的变量。要确定第六积分常数，尚需进行一些变换。

(3)用偏近点角 E 代替真近点角 V

图 2.8 表示偏近点角 E 与真近点角 V 的关系。在卫星轨道椭圆上，以椭圆中心 O' 为圆心，以椭圆长半径 a 为半径作一辅助圆 $O'-AS'A'$，过卫星点 S 作 OA 的垂线 SR，延长 RS 交辅助圆 S'，连接 $O'S'$，则 $O'S'$ 与 OA 的夹角 E 称为偏近点角。

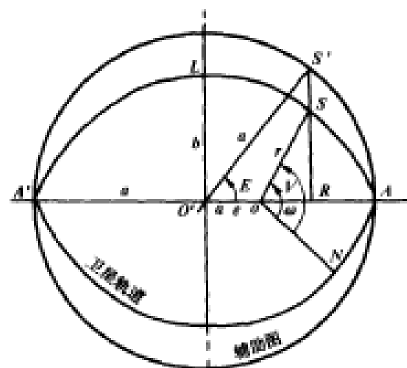


图 2.8　偏近点角 E 与真近点角 V

由图可见：$OR = r\cos V = a(\cos E - e)$，于是轨道方程式(2.45)可表示为：

$$r = a(1 - e\cos E) \tag{2.47}$$

这就是以偏近点角 E 表示的轨道方程。

还可以导出 V 与 E 的关系式：

$$\cos V = (\cos E - e)/(1 - e\cos E)$$
$$\tan(V/2) = \sqrt{(1+e)/(1-e)}\tan(E/2) \tag{2.48}$$

由此可见，偏近点角 E 也是一个与时间有关的辅助参数。

(4)开普勒方程

根据开普勒定律，卫星绕地球质心运行的轨迹是一椭圆，并且在单位时间内卫星至地心的向径所扫过的面积保持不变，这表明卫星在不同位置的角速度是不同的，在近地点处角速度最大，而在远地点角速度最小。设卫星沿椭圆运动的周期为 T，则平均角速度为：

$$n = 2\pi/T \tag{2.49}$$

由此得出开普勒第三定律的数学表达式：

$$n^2a^3 = \mu \tag{2.50}$$

建立以地球质心为坐标原点，x 轴指向近地点，y 轴重合于轨道的短轴，z 轴为轨道平面的法线方向，构成右手坐标系。在此坐标系内列出卫星运动的微分方程并求解，可以得出著名的开普勒轨道方程：

$$n(t - \tau) = E - e\sin E \tag{2.51}$$

式中：τ——第六个积分常数，它给出了辅助参数 E 与时间 t 的函数关系。

由开普勒轨道方程知，当 $t = \tau$ 时，$E = 0$。顾及轨道方程式(2.47)，可得 $r = a(1-e)$。说明此时卫星正位于近地点处。从而证明了 τ 是卫星过近地点的时刻。

令 $M = n(t-\tau)$，则 M 随时间 t 以平均角速度 n 变化，故称 M 为平近点角。又令 $M_0 = n\tau$ 为过近地点的平近点角，则：

$$M = n(t - \tau) = nt - M_0 \tag{2.52}$$

开普勒轨道方程可写为：

$$M = E - e\sin E \tag{2.53}$$

也可以 M_0 代替 τ 作为积分常数。

至此，我们得到了以轨道根数表示的六个积分常数（i,Ω,a,e,ω,τ）或（$i,\Omega,a,e,\omega,$

M_0)。若已知六个轨道根数,就可以惟一地确定卫星的运动状态。也就是说,已知六个轨道根数便可以确定任意时刻的卫星位置及其运动速度。

2.6 卫星的受摄运动

对于卫星精密定位来说,若只考虑地球引力是不能满足精度要求的。必须考虑地球引力场摄动力、日月摄动力、大气阻力、光压摄动力、潮汐摄动力等对卫星运动状态的影响。考虑了各种摄动力作用的卫星运动称为卫星的受摄运动。

讨论二体问题时,六个轨道根数均为常数。其中卫星过近地点的时刻 τ 也可用平近点角 M_0 代替。在考虑了摄动力的作用后,卫星的受摄运动的轨道根数不再保持为常数,而是随时间变化的轨道根数。卫星在地球质心引力和各种摄动力影响下的轨道根数称为瞬时轨道根数。卫星运动的真实轨道称为卫星的摄动轨道或瞬时轨道。瞬时轨道不是椭圆,轨道平面在空间的方向也不是固定不变的。

研究卫星的受摄运动与研究二体问题的方法相类似,首先按卫星受到的各种作用力的物理特性导出其数学表达式,然后建立摄动力的微分方程,最后解算微分方程从而求出卫星运动的方程。

2.6.1 各种作用力的特性及其影响

(1)地球引力场摄动力

地球引力场对卫星的引力包括地球质心引力和地球引力场摄动力两部分。地球引力场摄动力是由于地球形状不规则及其质量不均匀而引起。地球引力是一种保守力,可以建立一个位函数 $U(r,\varphi,\lambda)$ 来表示地球外部空间一个质点所受的作用力。其位函数的一般形式为:

$$U(r,\varphi,\lambda) = GM/r + R \tag{2.54}$$

式中:r——质点地心矢径的模;

φ、λ——质心的球面坐标。

式(2.54)右边第一部分 GM/r 为地球形状规则和密度均匀所产生的正常引力位,卫星在它的作用下作二体运动,其轨道为正常轨道。第二部分 R 为摄动函数。由于地球形状很不规则,其内部质量的分布也不均匀,摄动位函数 R 不能用一个简单的封闭公式表示,可用无穷级数(球函数展开式)表示。R 是卫星位置的函数,它使卫星运动的轨道根数随时间而变化。略去 10^{-6} 及更小量级的地球引力场摄动力的位函数可写为:

$$R = -J_2(3\sin^2\varphi - 1)/(2r^3) \tag{2.55}$$

式中:J_2 是地球引力场位函数的二阶带谐系数。考虑到 $\sin\varphi = \sin i\sin(\omega + V)$,则有

$$R = -J_2[(0.5 - 0.75\sin^2 i) + 0.75\sin^2 i\sin^2(\omega + V)]/r^3 \tag{2.56}$$

式(2.56)中的 J_2 为已知的引力场常量,它为 10^{-3} 量级(天体力学中常称为一阶小量),i、ω 为轨道根数,V 为真近点角。r 和 V 可以进一步化为轨道根数 a,e,M 和时间 t 的函数。

(2)日、月引力

卫星和地球同时受到日、月的引力。日、月引力造成卫星相对于地球的摄动力可表示为:

$$\begin{aligned} F_S + F_m = {} & Gm_s[(r_s - r)/|r_s - r|^3 - r_s/|r|^3] \\ & + Gm_m[(r_m - r)/|r_m - r|^3 - r_m/|r|^3] \end{aligned} \tag{2.57}$$

式中：m_s，m_m——分别表示太阳与月球的质量；

r_s，r_m 与 r 分别表示太阳、月球和卫星的位置矢量。

日、月引力影响的量级约为 $5\times10^{-6}\mathrm{m/s^2}$，在五天弧段对卫星位置的影响可达 1～3km，这意味着需要以 $10^{-4}\sim10^{-5}$ 的相对精度确定这些引力，即精确至 $10^{-10}\mathrm{m/s^2}$。对于太阳、月亮位置的计算应按这一相对精度要求。

(3)太阳辐射压力

卫星在运动中受到的太阳光辐射的压力为：

$$F_P = -K\rho_P S r^{\circ}_s \tag{2.58}$$

式中：K——卫星表面反射系数；

ρ_P——光压强度，在距太阳为地球轨道半径处太阳光压强度通常取为 $4.5605\times10^{-6}\mathrm{N/m}$；

S——垂直于太阳光线的卫星截面积；

r°_s——太阳在坐标系中的位置单位矢量。

对于 GPS 卫星五天弧段，太阳辐射压力可使卫星位置的偏差达到约一千米。

(4)地球潮汐作用力

日月引力作用于地球，使之产生形变(固体潮)或质量移动(海潮)，从而引起地球质量分布的变化，这一变化将引起地球引力的变化。可以将这种变化视为在不变的地球引力中附加一种小的摄动力——潮汐作用力。在五天的弧段中潮汐作用力对 GPS 卫星位置的影响可达 1m。

(5)大气阻力

大气阻力对低轨道的卫星较大。但在 GPS 卫星所在的高度上(2 万公里)，大气阻力已微不足道，可不考虑。

综上所述，在人造地球卫星所受的摄动力中，地球引力场摄动力最大，约为 10^{-3} 量级。其它摄动力大多小于或近于 10^{-6} 量级。由于这些摄动力会引起卫星位置的变化，因而引起轨道根数的变化。例如，考虑地球引力场摄动力中 J_2 项的影响，使轨道根数 Ω 不断减小，即轨道平面不断西退，这种现象称为轨道面的进动。进动速度主要取决于轨道倾角 i 和轨道长半径 a。对于两万公里高度，倾角约为 55°的 GPS 卫星来说，其进动速度约为 0.039°/天。轨道根数 ω 的变化使得近地点在轨道面内不断旋转，或者说轨道椭圆以其不变的形状在轨道面内旋转。

2.6.2 卫星受摄运动方程

(1)用空间直角坐标表示的受摄运动方程

在空间直角坐标系中，卫星的受摄运动方程形式简单。设作用于卫星上的总摄动力位函数为 R，则受摄运动方程的分量形式可写为：

$$\left.\begin{aligned}\ddot{x} &= -(\mu/r^3)x + \frac{\partial R}{\partial x}\\ \ddot{y} &= -(\mu/r^3)y + \frac{\partial R}{\partial y}\\ \ddot{z} &= -(\mu/r^3)z + \frac{\partial R}{\partial z}\end{aligned}\right\} \tag{2.59}$$

式中：$-(\mu/r^3)x$，$-(\mu/r^3)y$，$-(\mu/r^3)z$——卫星在地球质心引力作用下产生的加速度沿三个坐标轴的分量。这种形式的微分方程不适合用分析的方法求解，但可以用数值方法求解。在求解的过程中不涉及由于卫星的轨道根数，难以得到关于卫星的轨道根数及其变化规律。而以轨道根数表示的受摄运动方程则既可以用于数值解法也可用于分析解法。

(2)用轨道根数表示的受摄运动方程

拉格朗日用参数变易法解式(2.59),得到以二体问题轨道根数为变量的受摄运动方程:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} &= \frac{2}{na}\frac{\partial R}{\partial M_0}\\
\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} &= \frac{1-e^2}{na^2e}\frac{\partial R}{\partial M_0} - \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2e}\frac{\partial R}{\partial \omega}\\
\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} &= \frac{1}{na^2\tan i\sqrt{1-e^2}}\frac{\partial R}{\partial \Omega}\\
\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} &= \frac{1}{na^2\sqrt{1-e^2}\sin i}\frac{\partial R}{\partial i}\\
\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} &= \frac{1-e^2}{na^2e}\frac{\partial R}{\partial e} - \frac{1}{na^2\tan i\sqrt{1-e^2}}\frac{\partial R}{\partial i}\\
\frac{\mathrm{d}M_0}{\mathrm{d}t} &= -\frac{2}{na}\frac{\partial R}{\partial a} - \frac{1-e^2}{na^2e}\cdot\frac{\partial R}{\partial e}
\end{aligned}\right\} \tag{2.60}$$

拉格朗日行星运动方程说明受摄运动与二体问题不同,这时的轨道根数已不是常数,其随时间的变化率取决于等式右端的表达式(包括轨道根数和摄动函数对根数的偏导数)。

应用拉格朗日行星运动方程解卫星受摄运动可按下述步骤进行:

1)导出式(2.60)右端摄动函数 R 的具体表达式,将 R 改化为卫星轨道根数的函数以便求导;

2)解受摄运动方程,得到指定时刻的瞬时轨道根数;一般给定的初始条件是对应历元时刻 t_0 的轨道根数 $\sigma(t_0)$;如果给定的初始条件是历元时刻的运动状态 $r(t_0)$, $\mathrm{d}r/\mathrm{d}t$,也可以按二体问题改化为 $\sigma(t_0)$;

3)计算对应时刻的卫星位置 $r(t)$ 及速度 $\mathrm{d}r/\mathrm{d}t$。依瞬时轨道根数 $\sigma(t)$ 按二体问题的公式计算卫星在 t 时刻的位置与速度。

以上过程称为分析法。在分析法中,通常使用级数解法,即将含有轨道根数 σ 的函数按 σ 的近似值展开为级数而后用逐步迭代的方法求得一定精度的解。

但是,如果摄动力的性质为非保守力时,例如太阳辐射压力、大气阻力因不存在位函数,显然不能使用拉格朗日行星运动方程解卫星受摄运动。此时,可将摄动力所产生的加速度分解为互相垂直的三个分量 S、T、W。S 为沿卫星矢径方向的分量,T 为在轨道平面垂直于矢径方向并指向卫星运动方向的分量,W 为沿轨道平面法线并按 S、T、W 组成右手坐标系取向的分量。这样,便可导出牛顿受摄运动方程:

$$\left\{\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} &= \frac{2}{n\sqrt{1-e^2}}[e\sin V\cdot S + (1+e\cos V)T]\\
\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} &= \frac{\sqrt{1-e^2}}{na}[\sin V\cdot S + (\cos E + \cos V)T]\\
\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} &= \frac{r\cos(\omega+V)}{na^2\sqrt{1-e^2}}W\\
\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} &= \frac{r\cos(\omega+V)}{na^2\sqrt{1-e^2}\sin i}W\\
\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} &= \frac{\sqrt{1-e^2}}{nae}\left[-\cos V\cdot S + \left(l+\frac{r}{p}\sin V\cdot T\right)\right] - \cos i\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t}\\
\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t} &= n - \frac{1-e^2}{nae}\left[-\left(\cos V - 2e\frac{r}{p}\right)S + \left(1+\frac{r}{p}\right)\sin V\cdot T\right]
\end{aligned}\right. \tag{2.61}$$

不论摄动力的性质如何，都可以使用牛顿受摄运动方程解卫星的受摄运动。其解算过程与使用拉格朗日行星运动方程相似。只是在导出方程右端函数时不需要摄动函数对轨道根数的偏导数，而是代之以摄动力的三个加速度分量 S、T、W。

通过研究卫星运动的二体问题可知，如果已知卫星运动的轨道根数，可以计算出卫星的状态，即卫星的位置和速度。二体问题中，轨道根数是不变的常数。由于卫星在运动中受到各种摄动力作用的影响，其轨道根数随时间而变化。若已知某一初始时刻的轨道根数，通过分析解算含有轨道根数的受摄运动方程，可以求得轨道根数的变率，从而求得任一时刻的轨道根数。这样，利用二体问题的运动方程就可以求得任一时刻的卫星位置和速度。

GPS 卫星定位中，GPS 卫星相当于一个动态已知点，需要知道 GPS 卫星的瞬时位置。通过卫星的导航电文将已知的某一初始历元的轨道根数及其变化率发给用户，即可计算出任一时刻的卫星位置。另外，也可以通过在已知的地面站对 GPS 卫星进行观测，求得卫星在某一时刻的位置，可以反求出卫星的轨道根数，从而对卫星的轨道进行改进，实现精密定轨，用于 GPS 精密定位。

2.7 GPS 卫星星历

卫星星历是描述卫星运动轨道的信息。也可以说卫星星历就是一组对应某一时刻的轨道根数及其变化率参数。有了卫星星历就可以计算出任一时刻的卫星位置及其速度。GPS 卫星星历分为广播星历和精密星历两种。

广播星历通常包括相对某一参考历元的开普勒轨道根数和必要的轨道摄动改正项参数。相应参考历元的卫星开普勒轨道根数也叫参考星历。参考星历只代表卫星在参考历元的轨道根数，但是在摄动力的影响下，卫星的实际轨道随后将偏离参考轨道。偏离的程度主要取决于观测历元与所选参考历元之间的时间差。如果用轨道根数的摄动项对已知的卫星参考星历加以改正，就可以外推出任一观测历元卫星星历。广播星历参数的选择采用了开普勒轨道根数加调和项修正的方案。GPS 卫星的运动在二体运动的基础上加入了长期摄动和周期摄动。其中主要的周期摄动是周期约六小时的二阶带谐项引起的短周期摄动。

GPS 广播星历参数共有 16 个，其中包括 1 个参考时刻，6 个对应参考时刻的开普勒轨道根数和 9 个反映摄动力影响的参数。这些参数通过 GPS 卫星导航电文传递给用户。

导航电文中有关广播星历参数及时钟改正参数的符号及其定义如下：

t_{oe}——星历表参考历元(s)；

IODE(AODE)——星历表数据龄期(N)；

M_0——按参考历元 t_{oe} 计算的平近点角(弧度)；

Δn——由精密星历计算得到的卫星平均角速度与按给定参数计算所得的平均角速度之差(弧度)；

e——轨道第一偏心率(N)；

$\sqrt{a}$——轨道长半径的平方根($m^{\frac{1}{2}}$)；

Ω_0——按参考历元 t_{oe} 计算的升交点赤径(rad)；

i_0——按参考历元 t_{oe} 计算的轨道倾角(rad)；

ω——近地点角距(rad)；

$\dot{\Omega}$——升交点赤径变化率(rad/s)；
$\dot{i}$——轨道倾角变化率(rad/s)；
C_{uc}——升交矩角的余弦调和项改正的振幅(rad)；
C_{us}——升交矩角的正弦调和项改正的振幅(rad)；
C_{rc}——卫星矢径的余弦调和项改正的振幅(m)；
C_{rs}——卫星矢径的正弦调和项改正的振幅(m)；
C_{ic}——轨道倾角的余弦调和项改正的振幅(rad)；
C_{is}——轨道倾角的正弦调和项改正的振幅(rad)；
GPD——周数(周)；
T_{gd}——电离层延迟改正(s)；
IODC——星钟的数据龄期(N)；
a_0——卫星钟差(s)；
a_1——卫星钟速(s/s)；
a_2——卫星钟漂(s/s^2)；
卫星精度——(N)；
卫星健康——(N)。

其中 Δn 中包括了轨道根数 ω 的常期摄动量。Δn 中主要是二阶带谐项引起的 ω 的长期漂移，也包括了日、月引力摄动和太阳光压摄动。在 $\dot{\Omega}$ 中主要是二阶带谐项引起 Ω 的长期漂移，也包括了极移的影响。

参考历元 t_{oe} 是从星期日子夜零点开始计算的参考时刻，星历表数据龄期 IODE 是从 t_{oe} 时刻与最后观测时刻之间的时间差，故 IODE 是预报星历的外推时间间隔。

表 2.3 列出了一组 GPS 卫星广播星历数据(时间：1997J11M09d02h00m0.0s)。

GPS 卫星广播星历　　表 2.3

星历参数	卫星 PRN06	卫星 PRN09
a_0(s)	−0.231899321079E−06	−0.176629982889E−04
a_1(s/s)	0	−0.136424205266E−11
a_2(s/s^2)	0	0
t_{oe}(s)	0.720000000000E+04	0.720000000000E+04
$IODE$(s)	0.970000000000E+02	0.236000000000E+03
$\sqrt{a}$($m^{\frac{1}{2}}$)	0.515365263176E+04	0.515372833443E+04
e	0.678421219345E−02	0.679769460112E−02
i_0(rad)	0.958512160302E+00	0.944330399837E+00
ω(rad)	−0.258419417299E+01	0.268325835957E+00
Ω_0(rad)	−0.1378359822556E+01	0.278150082653E+01
M_0(rad)	−0.290282040486E+00	−0.313088539563E+00
Δn(rad/s)	0.451411660250DFE−08	0.506342519770E−08
$\dot{\Omega}$(rad/s)	−0.819426989566E−08	−0.838284917932E+08
$\dot{i}$(rad/s)	−0.253939149013E−09	0.333585323739E−09

续上表

星历参数	卫星 PRN06	卫星 PRN09
C_{us}(rad)	0.912137329578E－05	0.850856304169E－05
C_{uc}(rad)	0.189989805222E－06	0.259180204773E－05
C_{is}(rad)	0.949949026108E－07	0.745058059692E－08
C_{ic}(rad)	0.130385160446E－07	0.894069671631E－07
C_{rs}(rad)	0.406250000000E＋01	0.482187500000E＋02
C_{rc}(rad)	0.201875000000E＋03	0.207437500000E＋03
GPD(C)	0.931000000000E＋03	0.931000000000E＋03
T_{gd}(s)	0.186264514923E－08	0.512227416036E－08
IODC(N)	0.353000000000E＋03	0.236000000000E＋03
卫星精度(N)	0.700000000000E＋01	0.700000000000E＋01
卫星健康(N)	0	0

GPS 卫星向全球用户播发的星历，是调制在两种伪随机测距码上进行传送的。一种是用叫做 C/A 码所传送的 GPS 卫星星历(简称 C/A 码星历)，其星历精度为数十米。另一种用 P 码所传送的 GPS 卫星星历(简称 P 码星历)精度提高到 5m 左右，只有工作于 P 码的接收机才能从 P 码中解译出精密的 P 码星历。精密的 P 码星历主要用于军事目的导航定位。C/A 码星历对民用用户开放。目前绝大多数的商用接收机，只能接收到 C/A 码，只能使用 C/A 码所携带的广播星历。由于广播星历精度较低，给用户的 GPS 定位带来了较大误差。这是非特许用户进行高精度的 GPS 测量时必须解决的一个问题。利用精密的事后处理星历能够解决这一问题。

精密事后处理星历是一些国家某些部门，根据各自建立的卫星跟踪站所获得的对 GPS 卫星的精密观测资料，应用与确定广播星历相似的方法计算得到的卫星星历。它可以向用户提供在用户观测时间内的卫星星历，避免了星历外推的误差。由于这种星历是在事后向用户提供的在其观测时间内的精密轨道信息，因此称为后处理星历或精密事后星历。这种星历不是通过 GPS 卫星的导航电文向用户传递，而是利用磁带或通过电视、电传、卫星通讯或互联网络等方式有偿地为所需要的用户提供的数据服务。

3 GPS 信号结构与 GPS 接收机

3.1 GPS 卫星信号的基本结构

3.1.1 概述

GPS 卫星信号是 GPS 卫星向广大用户发送的用于导航定位的调制波，它包含有：载波、测距码和数据码。时钟基本频率为 10.23MHz。GPS 信号的产生如图 3.1 所示。

GPS 有 L 波段的两种载波：

L_1 载波：$f_{L1} = 154 \times f_0 = 1575.42\text{MHz}$，波长 $\lambda_1 = 19.03\text{cm}$

L_2 载波：$f_{L2} = 120 \times f_0 = 1227.6\text{MHz}$，波长 $\lambda_2 = 24.42\text{cm}$。

选择这两个 L 波段的载频，目的在于测量或消除由于电离层效应而引起的延迟误差。

在无线电通信技术中，为了有效地传播信息，都是将频率较低的信号加载在频率较高的载波上，此过程称为调制。然后载波携带着有用信号传送出去，到达用户接收机。

GPS 卫星的测距码和数据码是采用调相技术调制到载波上的。调制码的幅值只取 0 或 1。当码值取 0 时，对应的码状态为 +1，而码值取 1 时，对应码状态为 -1，那么载波和相应的码状态相乘后便实现了载波的调制。这时，当载波与码状态 +1 相乘时，其相位不变，而当与码状态 -1 相乘时，其相位改变 180°。所以当码值从 0 变 1 或从 1 变为 0 时，都将使载波相位改变 180°。这时的载波信号实现了调制码的相位调制(见图 3.2)。

根据以上二级调制的原理，GPS 中的三种信号将按图 3.3 的线路进行调制合成，然后向地球发射，形成随时都可以接收到的 GPS 信号。在 L_1 载波上由数据码和两种伪随机码分别以同相和正交方式进行调制，其信号结构为：

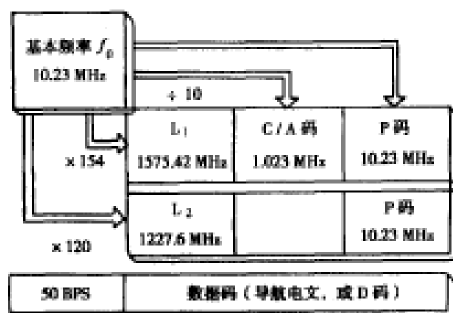


图 3.1 GPS 信号的产生

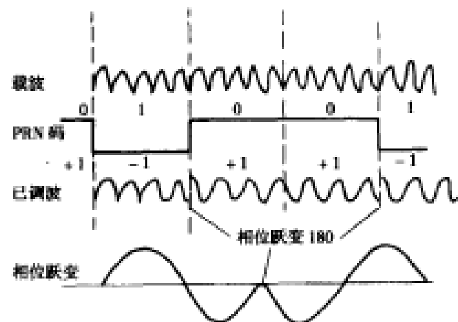


图 3.2 伪噪声码的相位调制

$$S_{L_1}^i(t) = A_p P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_{L_1} t + \varphi_1) + A_c C_i(t) D_i(t) \times \sin(\omega_{L_1} t + \varphi_1) \tag{3.1}$$

在 L_2 载频上，只有 P 码进行双相调制，其信号结构为：

$$S_{L_2}^{i}(t) = B_p P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_{L_2} t + \varphi_2) \tag{3.2}$$

式中：A_p、B_p、A_c——P码和C/A码的振幅；

$P_i(t)$、$C_i(t)$——精码和粗码；

$D_i(t)$——数据码；

ω_{L_1}，ω_{L_2}——载波 L_1 和 L_2 的角频率；

φ_1，φ_2——信号 L_1 和 L_2 的初相。

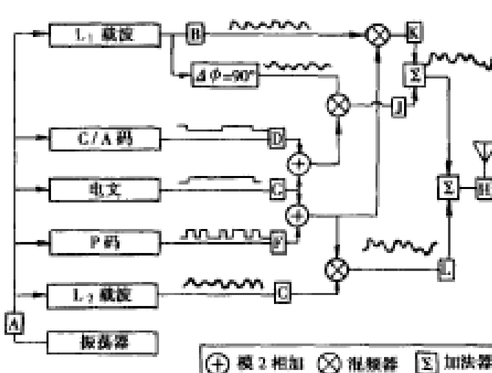


图 3.3　GPS卫星信号构成图

从图3.5中可看出，卫星发射的所有信号分量都是由同一基本频率 f_0（A 点）产生的，其中包括：载波 L_1（B 点），L_2（C 点），粗测距码 C/A（D 点），精测距码（F 点）和数据码（G 点）。经卫星发射天线（H 点）发射出去。发射的信号分量包括：L_1-C/A 码（J 点），L_1-P 信号（K 点），L_2-P 信号（L 点）。表3.1列出了GPS信号中各频率与基本频率 f_0 之间的关系。

GPS 信号的频率关系　　　　表 3.1

项　目	名　称		
	基频 f_0	载波 f_{L_1}	载波 f_{L_2}
基本频率 f_0	10.23MHz	$154f_0$	$120f_0$
C/A 码的码率 f_c	$f_0/10$	$f_{L_1}/1540$	$f_{L_2}/1200$
P 码的码率 f_p	f_0	$f_{L_1}/154$	$f_{L_2}/120$
D 码的码率 f_d	$f_0/204600$	$f_{L_1}/31508400$	$f_{L_2}/24552000$

3.1.2 GPS 信号的特点

(1)载波频率选用 L 波段的两个频率

载波选用两个频率：

$$f_{L_1} = 1575.42\text{MHz}, \lambda_1 = 19.03\text{cm}, f_{L_2} = 1227.60\text{MHz}, \lambda_2 = 24.42\text{cm}$$

L 波段电离层延迟影响较小，信道带宽分配易实现。采用两个频率，可测定电离层延迟，消除电离层延迟误差。

(2)采用伪随机噪声码测距技术

GPS采用伪随机噪声码测距技术，是因为其具有良好的抗干扰性和保密性能较好的特点。GPS采用两种测距码，即C/A码和P码。C/A码是粗捕获码(Coarse Acguisition Code)，其码长为1023码元，周期为1ms，很易于捕获，故称为粗捕获码；该码也可用于测距，但精度较低。P码是精密测距码(Precise Code)，其码长为235469592765000码元，周期约为266天9小时，难于捕获，易于保密。采用P码测距精度高，且无模糊度。

(3)采用二级调制

首先将低码率(50Hz)的数据码D调制在P码和C/A码上，构成组合码；然后用组合码PD和PC调制载波。这样就把发送低频率的D码转变为发送复组合码，既节省卫星的电能，又增强了抗干扰能力，提高了保密性能。

3.1.3 GPS信号编码

测距码即伪随机噪声码(Pseudo-random Noise Code)是一种可以预先确定并可重复产生和复制,具有白噪声随机统计特性的二进制码序列,简称为伪随机码,或伪噪声码,或PRN码。40年代末和50年代初,仙农(G.E.Shannon)等人建立了"噪声通信"理论,证明具有白噪声统计特性的信号对充分利用信道的容量与信号的功率,抗多径干扰和测定距离等具有明显的优点。到60年代中期,噪声通信理论获得实际应用和发展。利用伪随机码信号可以实现低信噪比接收,可实现码分多址通信,具有良好的保密性。现在,伪随机码已广泛用于通信、无线电测距等领域。

GPS的C/A码和P码,都是由最长线性移位寄存器码序列(简称m序列)产生的复合码。因此,本节首先简要介绍m序列和复合码,然后论述C/A码和P码及其主要特性。

3.1.3.1 二进制序列的运算

二进制序列有两种表述方式:一种是用1和0表述;另一种是用-1和1表述。应用哪种表述方式,可根据讨论问题的方便来选择。一般是在理论探讨时采用前者较方便,而在另一些问题或形象化图形表示时,则采用后者较适用。故称前者表述的序列为二进符号序列,用$\{x\}$表示;后者称为二进信号波形,以$x(t)$表示。表3.2给出了同一个二进制序列的两种表述方式。图3.4给出这两种表述方式的图形与符号的对应关系。

二进制序列的两种表达方式　　表3.2

名　　称	表达式	二进制序列								
二进符号序列	$\{x\}$	1	1	1	0	1	0	0	1	1
二进信号波形	$x(t)$	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1

图3.4中的τ_0为一码元对应的时间,以s(秒)为单位表示,称为码元宽度;L_p为一个周期内的码元数,称为码长,常用bit作为码长的单位。如本例$L_p=7$bit;T_p为以s(秒)为单位的时间周期$T_p=L_p\cdot\tau_0$。

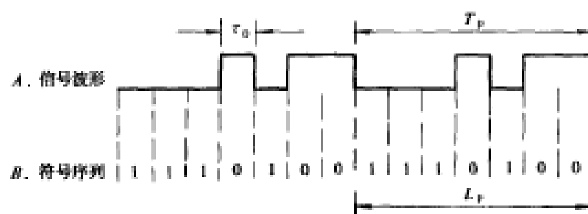


图3.4　二进制序列的表达方式

(1)二进符号序列的模2运算

二进符号序列的运算采用模2运算。模2运算可以看作为不进位的二进制运算。对于加法,通常用符号+表示,其运算规则为

$$\begin{cases}0\oplus 0=0\\0\oplus 1=1\\1\oplus 0=1\\1\oplus 1=0\end{cases}\tag{3.3}$$

对于模2加法,其交换律、结合律成立。

(2)二进信号波形的乘法运算

对于二进信号波形，采用普通乘法运算，其规则为：

$$\begin{cases}1\times1=1\\1\times(-1)=-1\\(-1)\times1=-1\\(-1)\times(-1)=1\end{cases}\tag{3.4}$$

显然，这两种运算方法是等效的。表3.3给出了两种表述形式的两种运算结果。

两种表述方式与运算结果 表3.3

两种运算	表述方式					
	$\{x\}$			$X(t)$		
	1　0			-1　1		
元素与运算结果	模2运算			乘法运算		
	a	b	$a\oplus b$	a	b	$a\times b$
	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	1	-1	-1
	1	0	1	-1	1	-1
	1	1	0	-1	-1	1

图3.5为$\{a\}$序列$\{b\}$序列模2运算和波形乘法运算的图形。

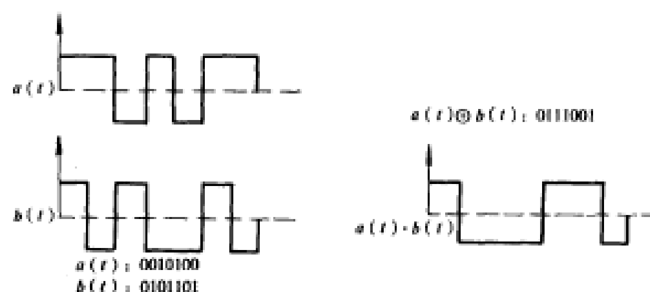


图3.5 序列及其波形的运算

3.1.3.2 最长线性移位寄存器序列——m序列

m序列是由"多级反馈移位寄存器"装置产生的。移位寄存器是由一组连接在一起的存储单元(触发器)组成。每个存储单元只有0或1两种状态。移位寄存器是在控制脉冲的作用下工作。控制脉冲有两个：一个是置"1"脉冲，在它的作用下，使各级存储单元的内容全处于"1"的状态；另一个是钟脉冲，当钟脉冲到来时，每个存储单元的内容都顺序地由一个单元移到下一个单元，而最后一个存储单元的内容便输出。

图3.6是一个4级反馈移位寄存器。它由4级触发器1、2、3、4构成。它取第4级和第3级的状态经模2加法器运算后反馈至第1级。这样在第4级的输出端就得到一个4级m序列。

移位寄存器的状态变化是：首先在置"1"脉冲作用下，移位寄存器各级均处于"1"的状态；当第一个钟脉冲到来时，各级寄存器的状态依次移位，而第3、4级的状态经模2加法运算而成为"0"，它被反馈至第1级触发器的输入端，而使第1级处于"0"状态。当钟脉冲依次到来，在

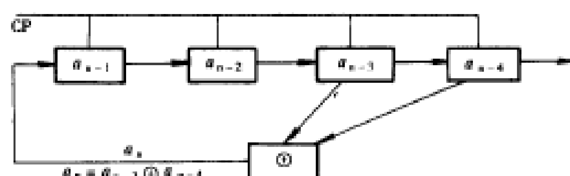


图 3.6　四级线性反馈移位寄存器

钟脉冲和反馈状态作用下，移位寄存器输出端的状态依次变化，其输出序列即如表 3.4 所示。

由表 3.4 可见，该序列具有周期性，一周期内包含 15 个码元，此为码长。由于 4 级移位寄存器最多有 $2^4 = 16$ 种不同状态，但其中全 0 状态不允许出现，因为处于全 0 状态，则输出将持续地为 0，因此，最多有 15 个状态。以上序列是 4 级移位寄存器的最长线性移位寄存器序列，简称为 m 序列。m 序列的周期是最长的周期。

四级反馈移位寄存器状态序列　　表 3.4

状态编号	各级状态 ①②③④	模 2 加反馈 ③⊕④	末级输出的序列	状态编号	各级状态 ①②③④	模 2 加反馈 ③⊕④	末级输出的序列
1	1 1 1 1	0	1	9	1 1 0 0	0	0
2	0 1 1 1	0	1	10	0 1 1 0	1	0
3	0 0 1 1	0	1	11	1 0 1 1	0	1
4	0 0 0 1	1	1	12	0 1 0 1	1	1
5	1 0 0 0	0	0	13	1 0 1 0	1	0
6	0 1 0 0	0	0	14	1 1 0 1	1	1
7	0 0 1 0	1	0	15	1 1 1 0	1	0
8	1 0 0 1	1	1				

将以上讨论扩展至 r 级移位寄存器，r 级可产生的同族码序列个数 J_r 按式(3.5)计算：

$$J_r = \varphi(2^r - 1)/r \tag{3.5}$$

式中：$\varphi(x)$——欧拉函数，其数值可等于 1、2、…、$(x-1)$ 中所有与 x 互素的正整数的个数。

表 3.5 给出了 1～24 级移位寄位存器的 m 序列的码长 L_p 和同族 m 码序列的个数 J_r。

r 级移位寄存器 m 序列的码长和同族码个数 J_r　　表 3.5

r	L_p 2^r-1	J_r $\varphi(2^r-1)/r$	r	L_p 2^r-1	J_r $\varphi(2^r-1)/r$
1	1	1	13	8191	630
2	3	1	14	16383	750
3	7	2	15	32767	1800
4	15	2	16	65535	2048
5	31	6	17	131071	7710
6	63	6	18	262143	8064
7	127	18	19	524287	27594
8	255	16	20	1048575	24000
9	511	48	21	2097151	84672
10	1023	60	22	4194303	120032
11	2047	176	23	8388607	356960
12	4095	144	24	16777215	276480

特征多项式：为了简单明确地表示反馈逻辑，采用特征多项式表示，即：

$$F(x) = C_0x^0 + C_1x^1 + C_2x^2 + \cdots + C_rx^r = \sum_{i=0}^{r} C_ix^i \tag{3.6}$$

式中：C_i——第 i 级移位寄存器馈线。

当 $C_i=0$ 表示馈线不存在，$C_i=1$ 表示馈线存在。其中 C_0 应始终取 1，因为当 $C_0=0$，表示总反馈线不存在，即无反馈。此时，将退化为静态移位寄存器，无法产生 m 序列。

3.1.3.3 m 序列的统计特性和相关特性

(1)统计特性：

m 序列具有与随机事件相似的统计特性。

1)在每一周期 T 内，两种元素出现的次数基本相等，仅相差一次，这是由于移位寄存器不允许出现全零状态所致。

2)在一个周期内，长度为 n 的游程(即同一元素连续出现 n 次)出现的次数，比长度为($n+1$)的游程出现次数多一倍。

由于 m 序列具有随机统计特性，故称其为伪随机码序列。

(2)m 序列的相关特性

两个周期同为 T 的周期函数 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$，其标称互相关函数 $\rho(\tau)$ 的定义为：

$$\rho(\tau) = \frac{1}{T}\int_0^T x_1(t)x_2(t-\tau)\mathrm{d}t \tag{3.7}$$

式中：τ——$x_2(t)$ 相对 $x_1(t)$ 的时间延迟。

当 $x_1(t)=x_2(t)$ 时，$\rho(\tau)$ 就为自相关函数：

$$\rho(\tau) = \frac{1}{T}\int_0^T x_1(t)x_1(t-\tau)\mathrm{d}t \tag{3.8}$$

对于二元码 m 序列，其自相关和互相关函数为：

$$\rho(\tau) = \frac{1}{L_p}\sum_{m=1}^{L_p} a_m a_{m-(\tau)}$$

$$\rho(\tau) = \frac{1}{L_p}\sum_{m=1}^{L_p} a_m b_{m-(\tau)} \tag{3.9}$$

式中：L_p——周期内码元数，即码长；

m——码的序号；

(τ)——相应于 τ 的码元数。

式(3.9)是用普通乘法表示，故码序列元素 a_m 和 $b_{m-(\tau)}$ 的取值应为 +1 或 −1。考虑到码运算中乘法和模 2 和的等效性，当序列元素用 1 或 0 表示，式(3.9)可写成：

$$\rho(\tau) = \frac{1}{L_p}\sum_{m=1}^{L_p} (a_m \oplus b_{m-(\tau)})$$

$$\rho(\tau) = \frac{1}{L_p}\sum_{m=1}^{L_p} (a_m \oplus a_{m-(\tau)}) \tag{3.10}$$

根据 m 序列的统计特性，自相关函数为：

$$\rho(\tau)=\begin{cases}1 & \tau=0,\pm T_p,\pm 2T_p,\cdots,\pm nT_p\\ -\dfrac{1}{L_p} & \tau\neq 0,\pm T_p,\pm 2T_p,\cdots,\pm nT_p\end{cases} \tag{3.11}$$

由式(3.11)可知，当 $\tau=0$ 时，$\rho(\tau)=1$ 为极大值；当 $\tau\neq 0$ 时，$\rho(\tau)=-\dfrac{1}{L_p}$ 是个最小值。由于 m 序列自相关函数只有两个可能的取值，故称 m 序列具有双值自相关函数特性。图 3.10 为 m 序列自相关函数的图形。m 序列自相关函数特性具有重要的意义，是伪随机码测距技术的理论基础。当卫星发射一伪随机码，而接收机内也产生（复制）一个相同的伪随机码，时间也是精确同步的。当卫星信号经过传播距离的延迟 τ 后到达接收机，与本地码进行相关处理；移动本地码，使相关函数达到最大值。这样，本地码所移动的时间延迟值就是卫星信号传播时间 τ，乘上光速值 c 得到所测距离。

应当指出，自相关函数 $\rho(\tau)$ 不仅在 $\tau=0$ 时为极大值，而在 τ 等于整周期时也出现极大值，如图 3.7 所示。因此，就产生多值性问题，在测距技术中称之为不定度或模糊度问题，需采用其它方法解决。



图 3.7　m 序列的自相关函数

m 序列的互相关函数是一个比较复杂的问题，经计算、研究可得出一个重要规律。若一个 r 级 m 序列，$r\leq 16$，且 $r\neq 4i(i=1,2,\cdots)$，则存在一组 M_r 个 m 序列。在该组内，各 m 序列的两两互相关函数为三值相关函数，其值为 $-1/L_p$，$-t(r)/L_p$，$-[t(r)-2]/L_p$。$t(r)$ 为移位寄存器级数 r 的函数，表 3.6 给出了 r 为 5～10 的 $t(r)/L_p$ 之值。这一组内 m 序列的互相关函数的绝对值较其它 m 序列间互相关函数绝对值的最大值 $|\rho|_{max}$ 要小很多，详见表 3.6。这表明，此组内的 m 序列具有良好的互相关特性。若用此组内的各 m 序列为各卫星的伪随机码，则不同卫星的信号就不会造成严重干扰，且解决了目标识别问题，这就是码分多址问题。

m 序列互相关函数的有关参数　　表 3.6

r	同族 m 序列数 J_r	码　长 L_p	$\|\rho\|_{max}$	M_r	$t(r)/L_p$
5	6	31	0.29	3	0.290
6	6	63	0.36	2	0.270
7	18	127	0.32	6	0.134
8	16	255	0.37	0	0.129
9	48	511	0.32	2	0.065
10	60	1023	0.37	3	0.064

由表 3.6 可知，这样的组内 m 序列的个数 M_r 很少，不能直接满足码分多址系统的要求。

然而，其互相关函数值小这一良好特性，却为今后构成足够多的哥尔德码族提供了基础。

3.1.4 GPS的伪随机码及其特性

GPS卫星播发两种伪随机测距码：一是精密测距码P码，由两个码长互素的m码组成模2和复码；另一个是粗捕获码C/A码，由两个具有良好互相关特性的同族m码序列构成的哥尔德码(Gold Code)族。

3.1.4.1 截短码与复合码

r级移位寄存器只能产生码长为$L_p=2^r-1$的m序列，然而实际应用中，往往需要各种不同码长序列。此时，可采用截短码或复合码来调整码长。

(1)截短码

截短码是将码长$L_p=2^r-1$的码截去一段ΔL_p，而构成码长$L'_p=L_p-\Delta L_p$的截短码。产生截短码的方法是：在移位寄存器反馈线路中加入一个"状态检测器"，使码长为L_p的移位寄存器在"状态检测器"的控制下，经过L'_p个状态后，发生一次跳跃，跳过后面($L_p-L'_p$)个状态而回到初始状态，从而得到一码长为L'_p的截短码。

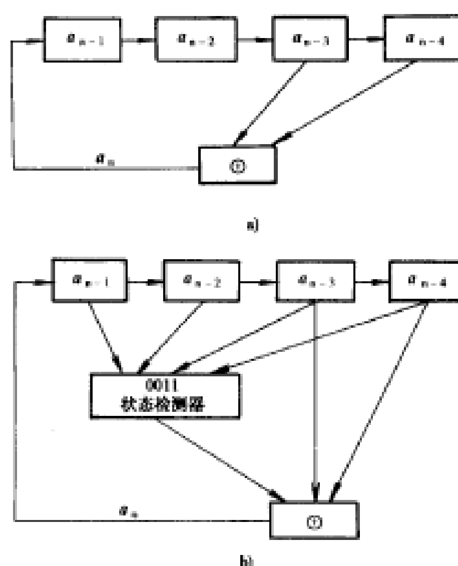


图3.8 m序列与截短序列的反馈逻辑
a) m序列；b) 截短序列

图3.8是4级移位寄存器产生截短码的方框图。该4级移位寄存器产生的m码的码长$L_p=15$，现要产生截短码$L'_p=11$。为此，选择初始状态为"1001"；状态检测器设置的状态为"0011"，其功能是：当寄存器状态为"0011"时即输出为1，而其它状态时均输出为0。将状态检测器输出加入到反馈线路中的模2加法器中，其效果是：当检测器输出为0时，不影响原模2加法器输出；当检测器输出为1时，就使模2加法器的输出由0变为1，或由1变为0，从而产生跳跃，完成一个序列的截短，产生$L'_p=11$的截短码。表3.7为序列状态表和跳跃点。

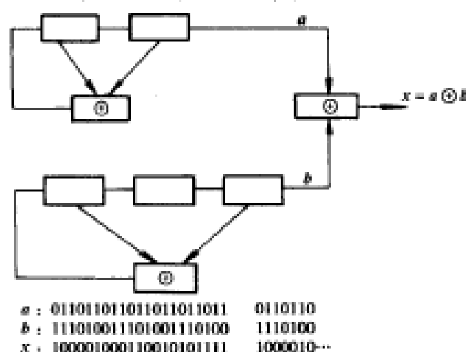


图3.9 模2和复合码

(2)复合码

如果需要一个较长的码序列，可以由两个或两个以上的短码构成一个长码，称为复合码。构成长码的短码称为子码。例如，一个码长$L_{pa}=3$的码序列$a(0,1,1)$和一个码长为$L_{pb}=7$的码序列$b(1,1,1,0,1,0,0)$取模2和，就可得到一个长码，码长为$L_{ps}=L_{pa}\cdot L_{pb}=21$，如图3.9所示。

显然，当子码为x_1、x_2、…、x_n，其码长为L_{p1}、L_{p2}、…、L_{pn}，且L_{p1}、L_{p2}、…、L_{pn}互素，则复合码x为

四级移位寄存器截短码的跳跃点　　表 3.7

状态序列	第①级	第②级	第③级	第④级	反馈输出
初始 1	1	0	0	1	1
2	1	1	0	0	0
3	0	1	1	0	1
4	1	0	1	1	0
5	0	1	0	1	1
6	1	0	1	0	1
7	1	1	0	1	1
8	1	1	1	0	1
9	1	1	1	1	0
10	0	1	1	1	0
跳跃 11	0	0	1	1	"1"
12	0	0	0	1	
13	1	0	0	0	
14	0	1	0	0	
15	0	0	1	0	

$$x = x_1 \oplus x_2 \oplus \cdots \oplus x_n$$

其码长为：

$$L_{px} = L_{p_1} \cdot L_{p_2} \cdots L_{p_n} \tag{3.12}$$

各子码的自相关函数为 $\rho_1(\tau)$、$\rho_2(\tau)$、…、$\rho_n(\tau)$，则复合码 x 的自相关函数 $\rho_x(\tau)$ 为：

$$\rho_x(\tau) = \rho_1(\tau) \cdot \rho_2(\tau) \cdots \rho_n(\tau) \tag{3.13}$$

表(3.8)给出了两个子码 x_1 与 x_2 构成的复合码 x 的自相关函数值。其中 x_1、x_2 分别由 3 级、4 级移位寄存器产生的 m 序列。

图 3.10 是表 3.8 之值用图形的表示形式。

由表 3.8 和图 3.10 可看出，复合码不仅增大码长，更重要的是大大改善了自相关函数的特性，从而缩短了寻找最大自相关值的过程。这是构成复合码的真正意义。

模 2 和复合码的自相关函数　　表 3.8

ρ	τ(码数)									
	0	1	2	…	7	…	14	15	…	105
ρ_1	1	$-\frac{1}{7}$	$-\frac{1}{7}$	…	1	…	1	$-\frac{1}{7}$	…	1
ρ_2	1	$-\frac{1}{15}$	$-\frac{1}{15}$	…	$-\frac{1}{15}$	…	$-\frac{1}{15}$	1	…	1
ρ_x	1	$\frac{1}{105}$	$\frac{1}{105}$	…	$-\frac{1}{15}$	…	$-\frac{1}{15}$	$-\frac{1}{7}$	…	1

3.1.4.2 GPS 的精码——P 码

P 码是由两个码长互素的子码 X_1 与 X_2 组成的模 2 和复合码：

$$P(t) = X_1(t) \oplus X_2(t + n_i\tau_p) \tag{3.14}$$

式中：n_i——子码 X_2 的延迟参数，规定 n_i 为区间[0,36]的正整数。

两个子码 X_1 与 X_2 均是由 24 级移位寄存器产生的截短码。$X_1(t)$ 的周期为 1.5s，码长 15345000 个码元；$X_2(t)$ 的码长 15345037 个码元，它比 $X_1(t)$ 长 37 个码元。X_1 与 X_2 的码速率

均为10.23Mb/s(兆比特/秒)，故P码的码长为：

$$L_p = 1534500 \times 15345037 = 235469592765000 \approx 2.3547 \times 10^{14}\text{bit}$$

其周期为：

$$T_p = L_p \cdot \tau_p = 266\text{d}9\text{h}45\text{min}55.5\text{s}$$

当式(3.14)中 n_i 取0、1、2、…36时，就构成37个平移等价的P码。这37个P码在一个星期多一点的时间都没有重复。如果每颗GPS卫星用一个P码，其使用期为一星期，那么每颗卫星都将具有唯一的与其它卫星不同的P码。这实质上是将长达38个星期的P码分为37个子区间，每个卫星使用一个子区间。

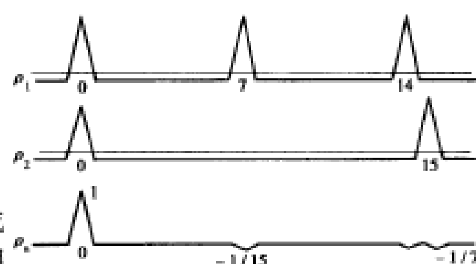


图3.10　模2和复合码的自相关函数

当各卫星信号到达接收机时，接收机的本地码P码与要测定的卫星信号P码，进行局部自相关检测：

$$\rho(\tau) = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} p(t)p(t-\tau)\mathrm{d}t \tag{3.15}$$

移动本地码时，当0延迟时($\tau=0$)，显然自相关函数达最大值为1。本地码移动值即为信号传播时间 τ。对于其它卫星信号P码，本地码与他们也是自相关。但由于时延参数很大(大于 (n_i-n_j) 个星期)，而复码P码具有良好的自相关特性，故相关函数值很小，不会造成干扰。

P码为很长的长码，具有诸多优点：(1)不容易破译，利于保密；(2)每个卫星用一个子区间，充分利用复码优良的自相关特性；(3)可进行无模糊测距。

但P码很长，不容易捕获，故需利用C/A码协助进行捕获。

3.1.4.3　GPS的粗码C/A码

C/A码是哥尔德码(Gold Code)。1967年R·Gold提出，利用两个同周期、具有良好互相关特性的同族的m码序列，组成复合码序列族，称此为哥尔德码。这些码既具有良好的自相关特性，又具有优良的互相关特性，可供码分多址系统选用。

GPS的C/A码是由两个10级移位寄存器产生的m序列 G_1 和 G_2，经模2和产生的复码，如图3.11所示。G_1 与 G_2 的特征方程为

$$\begin{cases} G_1(x) = 1 + x^3 + x^{10} \\ G_2(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10} \end{cases} \tag{3.16}$$

卫星上的时钟基准频率经频率综合器，给移位寄存器提供1.023MHz的时钟脉冲(CP)。G_1 和 G_2 的码长为 $L_{p1}=L_{p2}=1023$ 码元(bit)。因此，由 G_1 和 G_2 组成的复码，即哥尔德码，其码长仍为1023bit，周期为1ms。即：

$$G(t) = G_1(t) \oplus G_2(t + N_i\tau_0) \tag{3.17}$$

式中：τ_0——码元对应的时间，为1/1023ms；

N_i——G_1 与 G_2 间相位偏置的码元数。

在式(3.17)中，N_i 可有1023个不同的偏量，可产生1023个不同的哥尔德码序列。实际上，只需给几十颗GPS卫星分配不同的C/A码。因此，在实际生成C/A码时，采用 G_2 的输出不是直接由移位寄存器的末级输出，如图3.11所示。这样做的效果是产生一个与原 G_2 序列平移等价的序列，其平移量(延迟量)取决于选用哪两级做模2和运算。每颗卫星选用不同的

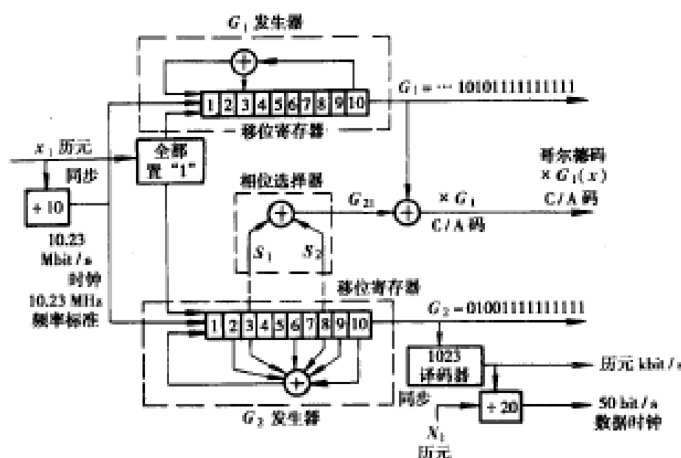


图 3.11　C/A 码发生器

两级抽头做模 2 和运算，产生不同的 C/A 码。按图 3.11 这样的 C/A 码发生器，可得到 $C_{10}^2+10=55$ 种不同的 C/A 码。

C/A 码是个短码，其码长 $L_{pc}=1023$bit，码元宽度为 $\tau_0=1/f\approx0.97752\mu s$，周期为 $T_{pc}=1ms$。码速率为 $f=1.023$Mbit/s。因此，该码易于搜索和捕获。C/A 码的码长相应为 299.792km，因此，用 C/A 码测距，在 300km 内无模糊度问题。

为了保持 C/A 码与 P 码同步，除采用共同的频率标准外，还在 P 码中 X_1 的每个历元时刻（初始状态时刻），使 C/A 码两个移位寄存器全部置 1。此外，C/A 码的钟脉冲(SP)也与该历元时刻同步。C/A 码与 P 码保持同步也是为了在捕获 C/A 的基础上便于捕获 P 码。

3.2　GPS 卫星的导航电文

GPS 卫星的导航电文（简称卫星电文）是用户用来定位和导航的数据基础。它主要包括：卫星星历、时钟改正、电离层时延改正、工作状态信息以及由 C/A 码捕获 P 码的信息。这些信息是以二进制码的形式，按规定格式组成，按帧向外播送，卫星电文又叫数据码（D 码）。它的基本单位是长 1500bit 的一个主帧（如图 3.12 所示），传输速率是 50bit/s，30s 传送完一个主帧。一个主帧包括 5 个子帧，第 1、2、3 子帧各有 10 个字码，每个字码有 30bit；第 4、5 子帧各有 25 个页面，共有 37500bit。第 1、2、3 子帧每 30s 重复一次，内容每小时更新一次。第 4、5 子帧的全部信息则需要 750s 才能够传送完，即第 4、5 子帧是 12.5min 播完一次，然后再重复之，其内容仅在卫星注入新的导航数据后才得以更新。

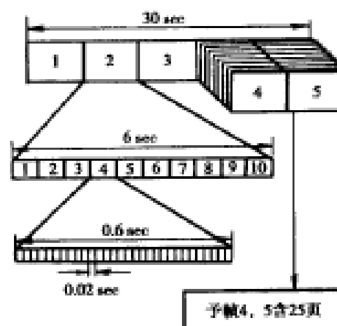


图 3.12　卫星电文的基本构成图

3.2.1　遥测码(TLW，即 Telemetry Word)

每个子帧的第一个字码为遥测码，它用来表明卫星注入数据的状态。遥测码的第 1～8 比

特是同步码，便于用户解释导航电文；第 9～22 比特为遥测电文，其中包括地面监控系统注入数据时的状态信息、诊断信息和其它信息。第 23 和第 24 比特是连接码；第 25～30 比特为奇偶检验码，它用于发现和纠正错误。

3.2.2 转换码（HOW，即 Hand Over Word）

转换码位于每个子帧的第二个字码。其作用是提供帮助用户从所捕获的 C/A 码转换到捕获 P 码的 Z 计数，它表示自上星期天零时起，P 码子码 X_1 的周期（1.5s）重复数。因此，当知道了 Z 计数，便能较快地捕获到 P 码。

3.2.3 第一数据块

第一数据块位于第 1 子帧的第 3～10 字码，它的主要内容包括：①标识码，时延差改正；②星期序号；③卫星的健康状况；④数据龄期；⑤卫星时钟改正系数等。

(1)时延差改正 T_{gd}

时延差改正 T_{gd}就是载波 L_1、L_2 的电离层时延差。当使用单频接收机时，为了减小电离层折射影响，提高定位精度，要用 T_{gd}改正观测结果；双频接收机可通过 L_1、L_2 两频率的组合观测值来消除电离层效应的影响，不需要此项改正。

(2)数据龄期 AODC

卫星时钟的数据龄期 AODC 是时钟改正数的外推时间间隔，它指明卫星时钟改正数的置信度。

$$\text{AODC} = t_{oc} - t_1 \tag{3.18}$$

式中：t_{oc}——第一数据块的参考时刻；

t_1——计算时钟改正参数所用数据的最后观测时间。

(3)星期序号 WN

WN 表示从 1980 年 1 月 6 日子夜零点（UTC）起算的星期数，即 GPS 星期数。

(4)卫星时钟改正

GPS 时间系统是以地面主控站的主原子钟为基准。由于主控站的原子钟也存在不稳定性，使得 GPS 时间和 UTC 时间之间存在着差值。地面监控系统通过监测确定出这种差值，并用导航电文播发给广大用户。

每一颗 GPS 卫星的时钟相对 GPS 时间系统存在着差值，需加以改正，这便是卫星时钟改正：

$$\Delta t_s = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 \tag{3.19}$$

式中：a_0——卫星钟差，(s)；

a_1——卫星钟速，(s/s)；

a_2——卫星钟漂(s/s^2)。

3.2.4 第二数据块

第二数据块包含第 2 和第 3 子帧，其内容表示 GPS 卫星的星历，这些数据为用户提供了有关计算卫星运动位置的信息，描述卫星的运行及其轨道的参数（如图 3.13 所示）。它包括下列三类参数。

(1)开普勒六参数

这6个参数为：$\sqrt{a}$，e，i_0，Ω_0，ω，M_0（其含义请见2.7节）。

(2)轨道摄动九参数

这9个参数为：Δn，$\dot{\Omega}$，$\dot{i}$，C_{uc}，C_{us}，C_{rc}，C_{rs}，C_{ic}，C_{is}。

(3)时间二参数

1)从星期日子夜零点开始度量的星历参考时刻t_{oe}；

2)星历表的数据龄期AODE，有

$$AODE = t_{oe} - t_1 \tag{3.20}$$

式中：t_1——作预报星历测量的最后观测时间，因此AODE就是预报星历的外推时间长度。

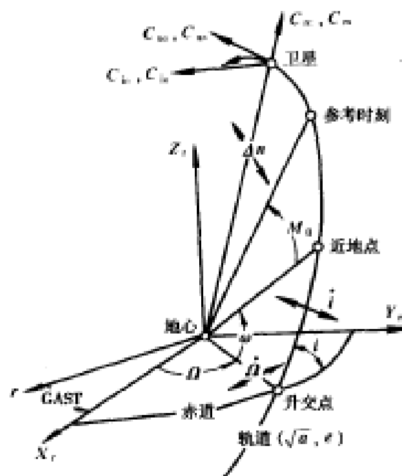


图3.13　GPS卫星轨道参数

3.2.5　第三数据块

第三数据块包括第4和第5两个子帧，其内容包括了所有GPS卫星的历书数据。当接收机捕获到某颗GPS卫星后，根据第三数据块提供的其它卫星的概略星历、时钟改正、卫星工作状态等数据，用户可以选择工作正常和位置适当的卫星，并且较快地捕获到所选择的卫星。

(1)第4子帧

1)第2、3、4、5、7、8、9、10页面提供第25～32颗卫星的历书；

2)第17页面提供专用电文，第18页面给出电离层改正模型参数和UTC数据；

3)第25页面提供所有卫星的型号、防电子对抗特征符和第25～32颗卫星的健康状况。

4)第1、6、11、12、16、19、20、21、22、23、24页面作备用，第13、14、15页面为空闲页；

(2)第5子帧

1)第1～24页面给出第1～24颗卫星的历书；

2)第25页面给出第1～24颗卫星的健康状况和星期编号。

在第三数据块中，第4和第5子帧的每个页面和第3字码，其开始的8个比特是识别字符，且分成两种形式：

a.第1和第2比特为电文识别(DATA ID)；

b.第3～8比特为卫星识别(SV ID)。

3.3　GPS卫星位置和速度的计算

GPS导航定位是以卫星为已知的基准点（可理解为动态空中后方交会的已知点），通过测量站星间的距离，解算用户的位置。因此，用户接收机在获得导航电文中的轨道参数后，就要首先计算某一时刻卫星的位置和速度。

根据广播星历计算卫星在WGS—84坐标系中的坐标时，由于广播星历精度不高，故此处卫星位置计算采用简略方法。首先按“二体问题”公式计算轨道参数；然后，根据导航电文给出

的轨道摄动参数，进行摄动修正，计算修正后的轨道参数；继而计算卫星在轨道坐标系的坐标；最后，仅顾及地球自转的影响，将轨道坐标系转换为 WGS—84 坐标系。

(1)计算卫星运行的平均角速度 n

首先按下式计算 n_0：

$$n_0 = \sqrt{GM/a^3} = \sqrt{\mu}/(\sqrt{a})^3 \tag{3.21}$$

式中：

$$\mu = GM = 3986005 \times 10^8 \mathrm{m}^3/\mathrm{s}^2$$

然后，根据电文给出的摄动改正数 Δn，计算经摄动修正后的平均角速度 n：

$$n = n_0 + \Delta n \tag{3.22}$$

(2)计算归化观测时间 t_k

电文中给出的 GPS 卫星轨道参数是对应于参考时刻 t_{oe}的。对于某时刻 t 观测卫星，需将观测时刻 t 归化为 t_k：

$$t_k = t - t_{oe} \tag{3.23}$$

式中：t_k——以参考时刻 t_{oe}为基准的归化观测时间。

在计算 t_k 时，应注意 t_{oe}是由每星期历元(星期六/星期日子夜零点)开始计量的。当 $t_k >$ 302400s 时，应减去 604800s；当 $t_k < -302400$s 时，应加上 604800s。

(3)计算观测时刻的卫星平近点角 M_k

$$M_k = M_0 + nt_k \tag{3.24}$$

式中：M_0——卫星电文中给出的参考时刻 t_{oe}的平近点角。

(4)计算观测时刻的偏近点角 E_k

根据卫星电文给出的偏心率 e 和算得的 M_k，用开普勒方程

$$E_k = M_k + e\sin E_k \tag{3.25}$$

按迭代方法进行解算。

解算方法是，首先赋予 E_k 初值为：$E_{k0} = M_k$，代入上式解算第一步迭代值。因 GPS 轨道偏心率 e 较小，约在 0.01 左右，故一迭代两次即可求准 E_k。

注意：式(3.25)中 E_k、M_k 均以 rad(弧度)为单位。若 E_k、M_k 采用角度制，则按下式计算：

$$E_k = M_k + 180° \cdot e\sin E_k/\pi \tag{3.26}$$

(5)计算真近点角 V_k

根据“二体问题”公式

$$\cos V_k = (\cos E_k - e)/(1 - e\cos E_k)$$

$$\sin V_k = (\sqrt{1 - e^2}\sin E_k)/(1 - e\cos E_k)$$

则 V_k 的计算公式为

$$V_k = \arctan(\sqrt{1 - e^2}\sin E_k)/(\cos E_k - e) \tag{3.27}$$

或采用下式计算 V_k

$$V_k = 2\arctan\left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}}\mathrm{tg}E_k/2\right) \tag{3.28}$$

(6)计算升交距角 Φ_k

$$\Phi_k = V_k + \omega \tag{3.29}$$

式中：ω——卫星电文给出的近地点角距。

(7)计算摄动改正项 δ_u、δ_r 和 δ_i

$$\begin{cases}\delta_u = C_{uc}\cos(2\Phi_k) + C_{us}\sin(2\Phi_k) \\ \delta_r = C_{rc}\cos(2\Phi_k) + C_{rs}\sin(2\Phi_k) \\ \delta_i = C_{ic}\cos(2\Phi_k) + C_{is}\sin(2\Phi_k)\end{cases} \tag{3.30}$$

(8)计算经摄动改正的升交矩角 u_k、卫星矢径 r_k 和轨道倾角 i_k：

$$\begin{cases}u_k = \Phi_k + \delta_u \\ r_k = a(1 - e\cos E_k) + \delta_r \\ i_k = i_0 + \delta_i + \dot{i} \cdot t_k\end{cases} \tag{3.31}$$

(9)计算卫星在轨道坐标系的位置

$$\begin{cases}x_k = r_k\cos u_k \\ y_k = r_k\sin u_k \\ z_k = 0\end{cases} \tag{3.32}$$

此坐标是卫星在轨道直角坐标系的位置。该坐标系的 z 轴指向轨道平面的法线方向，x 轴指向升交点方向。y 轴与 x、z 轴构成右手坐标系，如图 3.14 所示。

(10)计算观测时刻 t 的升交点经度 L_k

卫星轨道参数是以地心赤道坐标系(惯性系)为基准的。其升交点赤经 Ω 是由春分点 γ 起算。因此，要将(x_k、y_k、z_k)转换为 WGS—84 坐标系的坐标，首先要计算出升交点在观测时刻 t 的大地经度 L_k。

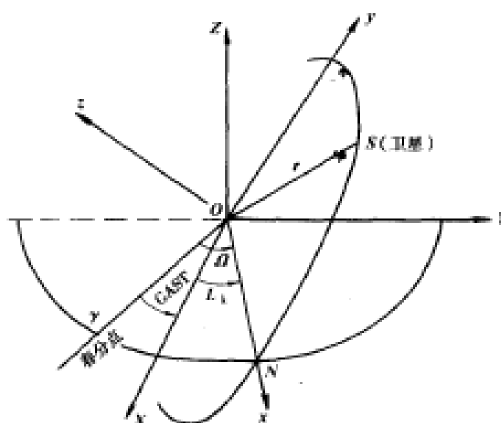


图 3.14　卫星轨道示意图

图 3.14 绘出了观测时刻 t 的 WGS—84 坐标系和卫星轨道坐标系及春分点方向。其中春分点方向为惯性坐标系 X 坐标轴方向，而 WGS—84 坐标系则是随地球旋转的惯性坐标系。

由图 3.14 可知，观测时刻的升交点 N 的大地经度 L_k 等于该时刻升交点赤经 Ω 与格林威治恒星时 GAST(春分点与起始子午线间的角矩)之差，即

$$L_k = \Omega - \text{GAST} \tag{3.33}$$

且知，观测时刻的升交点赤经为

$$\Omega = \Omega_{oe} + \dot{\Omega}\, t_k \tag{3.34}$$

式中：Ω_{oe}——参考时刻 t_{oe}的升交点赤经；

$\dot{\Omega}$——升交点赤经的变化率。

卫星电文仅提供了一个星期的历元开始时刻 t_{oe}的格林威治恒星时 GATS_{ω}。因为地球自转，GAST 随之不断增加，其速率即为地球自转的角速度 ω_e。故观测时刻 t 的格林威治恒星时为

$$\mathrm{GAST} = \mathrm{GAST}_{\omega} + \omega_e t \tag{3.35}$$

将式(3.34)和式(3.35)代入式(3.33)，得

$$L_k = \Omega_{oe} + \dot{\Omega}\, t_k - \mathrm{GAST}_{\omega} - \omega_e t \tag{3.36}$$

若令

$$\Omega_0 = \Omega_{oe} - \mathrm{GAST}_{\omega} \tag{3.37}$$

则式(3.36)变为

$$L_k = \Omega_0 + \dot{\Omega}\, t_k - \omega_e t$$

因 $t_k = t - t_{oe}$，则上式变为

$$L_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_e) t_k - \omega_e t_{oe} \tag{3.38}$$

此即计算升交点大地经度的公式。式中 Ω_0、$\dot{\Omega}$和 t_{oe}均是由卫星导航电文中得到。由式(3.37)可知，Ω_0既不是参考时刻 t_{oe}升交点的赤经，也不是准确的经度，故称为准经度。如此编排是为了计算简便。

(11)计算卫星在 WGS—84 坐标系的位置

根据图 3.14，将卫星在轨道坐标系的坐标(x_k、y_k、z_k)，经坐标转换，即可算得观测时刻卫星在 WGS—84 坐标系中的坐标：

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = R_z(-L_k) \cdot R_x(-i_k) \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix}$$

$$(z_k = 0) \tag{3.39}$$

式中：R_x、R_z——坐标旋转矩阵。

$$R_x(-i_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i_k & -\sin i_k \\ 0 & \sin i_k & \cos i_k \end{bmatrix}$$

$$R_z(-L_k) = \begin{bmatrix} \cos L_k & -\sin L_k & 0 \\ \sin L_k & \cos L_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将坐标旋转矩阵代入式(3.39)并顾及 $Z_k = 0$ 得：

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \cos L_k - y_k \cos i_k \sin L_k \\ x_k \sin L_k + y_k \cos i_k \sin L_k \\ y_k \sin i_k \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

式(3.40)为计算观测时刻卫星在 WGS—84 坐标系中三维位置的公式。

最后应指出两点：①以上所有计算，其时间均为统一的 GPS 时间；②卫星位置计算只考虑了地球自转的影响，没有顾及章动、岁差和极移等影响，因而是不严密的。但对广播星历来说，其精度影响不大，而且计算简便。

表 3.9 给出了 1997 年 11 月 9 日 2 时 0 秒对 GPS6 号卫星位置计算的结果。所用卫星星历参数见 2.7 节内容，请读者按照 11 月 9 日卫星的星历参数计算上述时刻的卫星位置。

卫星位置参数计算结果　表 3.9

参数＼卫星	PRN 06	参数＼卫星	PRN 06	参数＼卫星	PRN 06
$n_0=$	0.0001458557	$\delta_u=$	0.0000047471	$x_k=$	−25478990.3881606310
$n=$	0.0001458602	$\delta_r=$	176.5863343976	$y_k=$	−6865496.2704456421
$t_k=$	0.0000000000	$\delta_i=$	0.0000000590	$\Omega_k=$	−1.9033921161
$M_k=$	−0.2902820405	$u_k=$	−2.8783868484	$X_k=$	4589209.3952115914
$E_k=$	−0.2922365358	$r_k=$	26387762.1301899110	$Y_k=$	25371005.8730063250
$V_k=$	−0.2941974225	$i_k=$	0.9585122193	$Z_k=$	−5618292.299112
$\Phi_k=$	−2.8783915955				

3.4 GPS 接收机的基本工作原理

GPS 卫星发送的导航定位信号，是一种可供无数用户共享的信息资源。对于陆地、海洋和空中的广大用户，只要拥有能够接收、跟踪、变换和测量 GPS 信号的接收设备，即 GPS 信号接收机，即可在任何时候用 GPS 信号进行导航定位测量。根据使用目的的不同，用户要求的 GPS 信号接收机也各有差异。目前世界上已有几百家工厂生产各种型号的 GPS 接收机，产品也有几千种。这些产品可以按照原理、用途、功能等来分类。

3.4.1 GPS 接收机的分类

(1)按接收机的用途分类

GPS 接收机按用途可分为以下三种：

1)导航型接收机

此类型接收机主要用于运动载体的导航，可以实时给出载体的位置和速度。这类接收机一般采用 C/A 码伪距测量，单点实时定位精度较低，一般为 ±25m 左右，这类接收机价格便宜，应用广泛。根据应用领域的不同，此类接收机还可以进一步分为：

车载型——用于车辆导航定位；

航海型——用于船舶导航定位；

航空型——用于飞机的导航定位。

2)测地型接收机

测地型接收机主要用于精密大地测量和精密工程测量。这类仪器主要采用载波相位观测值进行相对定位，相对定位精度高。但其仪器结构复杂，价格较贵。

3)授时型接收机

这类接收机主要利用 GPS 卫星提供的高精度时间标准进行授时，常用于天文台及无线电通讯中的时间同步。

(2)按接收机的载波频率分类

1)单频接收机

单频接收机只能接收 L_1 载波信号，测定载波相位观测值进行定位。由于不能有效消除电离层延迟影响，单频接收机只适用于短基线(＜15km)的精密定位。

2)双频接收机

双频接收机可以同时接收 L_1、L_2 载波信号。利用双频对电离层延迟的不一样，可以消除电离层对电磁波信号延迟的影响，因此双频接收机可用于长达几千公里的精密定位。

(3)按接收机通道数分类

GPS 接收机能同时接收多颗 GPS 卫星的信号，为了分离接收到的不同卫星的信号，以实现对卫星信号的跟踪、处理和量测，具有这样功能的器件称为天线信号通道。根据接收机所具有的通道种类可分为：

1)多通道接收机

2)序贯通道接收机

3)多路复用通道接收机

(4)按接收机工作原理分类

1)码相关型接收机

码相关型接收机是利用码相关技术从调制波中分离得到导航电文(D 码)并测得伪距观测值。

2)平方型接收机

平方型接收机是利用载波信号的平方技术去掉调制信号，来恢复完整的载波信号，通过相位计测定接收机内产生的载波信号与接收到的载波信号之间的相位差，并能测定伪距观测值。其最大缺点是不能得到导航电文的内容。

3)混合型接收机

这种仪器是综合上述两种接收机的优点，既可以得到导航电文并能用码相位测定伪距，也可以得到载波相位观测值。

4)干涉型接收机

这种接收机是将 GPS 卫星作为射电源，采用干涉测量方法，测定两个测站间距离。

3.4.2 GPS 接收机的组成及工作原理

GPS 接收机主要由 GPS 接收机天线单元、GPS 接收机主机单元和电源三部分组成。接收机主机由变频器、信号通道、微处理器、存贮器及显示器组成(见图 3.15)。

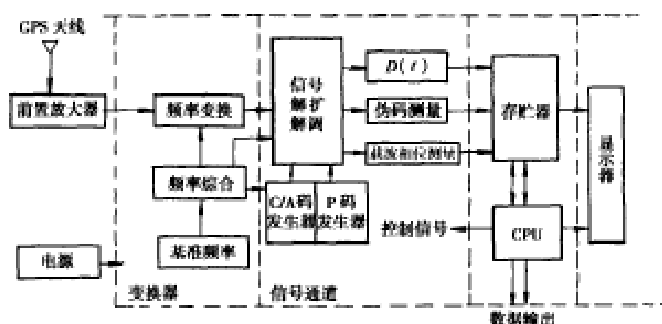


图 3.15 GPS 接收机原理图

(1)GPS 接收机天线

天线包括接收机天线和前置放大器两部分。天线的作用是将 GPS 卫星信号的极微弱的电磁波能转化为相应的电流，而前置放大器则是将微弱的 GPS 信号电流予以放大。为便于接

收机对信号进行跟踪、处理和量测，对天线部分有以下要求：

——天线与前置放大器应密封一体，以保障其正常工作，减少信号损失；

——能够接收来自任何方向的卫星信号，不产生死角；

——有防护与屏蔽多路径效应的措施；

——天线的相位中心保持高度的稳定，并与其几何中心尽量一致。

GPS接收机天线有下列几种类型：

1）单板天线

这种天线结构简单、体积较小，需要安装在一块基板上，属单频天线。

2）四螺旋形天线

四螺旋形天线是由四条金属管线绕制而成，底部有一块金属压抑制板。这种天线频带宽，全圆极化性能好，可捕捉低高度角卫星。缺点是不能进行双频接收，抗震性差，常用作导航型接收机天线。

3）微带天线

微带天线是在厚度为$h(h \leq \lambda)$的介质板两边贴以金属片。一边为金属底板，一边做成矩形或圆形等规则形状，见图3.16。这种天线也称为贴片天线。微带天线的特点是高度底，重量轻，结构简单并且坚固，易于制造；既可用于单频机，又可用于双频机。缺点是增益较低。目前大部分测地型天线都是微带天线。这种天线更适用于飞机、火箭等高速飞行物上。

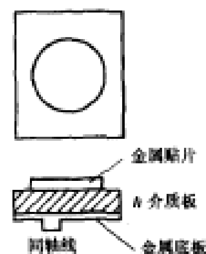


图3.16 微带天线

4）锥形天线

锥形天线是在介质锥体上，利用印刷电路技术在其上制成导电圆锥螺旋表面，也称盘旋螺线型天线。这种天线可以同时在两个频率上工作。锥形天线的特点是增益好。但是由于其天线较高，并且在水平方向上不对称，天线相位中心与几何中心不完全一致。因此，在安置天线时要仔细定向并且要给予补偿。

GPS天线接收来自20000km高空的卫星信号很弱，信号电平只有－50dB～－180dB；输入功率信噪比为S/N＝－30dB。即信号源淹没在噪声中。为了提高信号强度，一般在天线后端设有前置放大器。对于双频接收机设有两路前置放大器以减少带宽，控制外来信号干扰，也防止f_1和f_2信号干扰。大部分GPS天线都与前置放大器结合在一起，但也有些导航型接收机目的是将天线和前置放大器分开，为减少天线重量、便于安置、避免雷电事故等。

（2）接收机主机

1）变频器及中频放大器

经过GPS前置放大器的信号仍然很微弱，为了使接收机通道得到稳定的高增益，并且使L频段的射频信号变成低频信号，必须采用变频器。

2）信号通道

信号通道是接收机的核心部分，GPS信号通道是硬软件结合的电路。不同类型的接收机其通道是不同的。

GPS信号通道的作用有三：①搜索卫星，并跟踪卫星；②对导航电文数据信号实行解码，解调出导航电文内容；③进行伪距测量、载波相位测量及多普勒频移测量。图3.17为相关通道的电路原理图。

从卫星接收到的信号是扩频的调制信号，所以要经过解调才能得到导航电文。为了达到

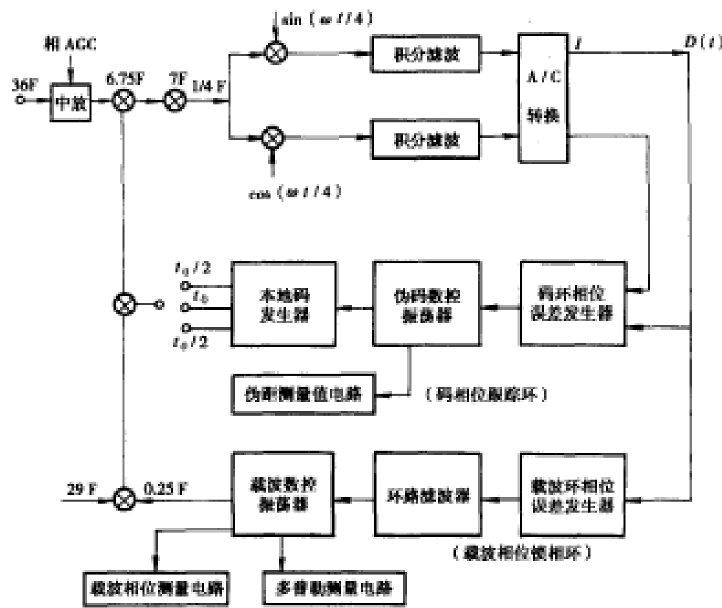


图 3.17　相关通道电路原理图

此目的，在相关通道电路中设有伪码相位跟踪环和载波相位跟踪环。

3)贮存器

接收机内设有贮存器或贮存卡以存贮卫星星历、卫星历书、接收机采集到的伪距观测值、载波相波观测值及多普勒频移等。目前，GPS 接收机都装有半导体存贮器(简称内存)，接收机内存数据可以通过数据接口传到微机上，以便进行数据处理和数据保存。在存贮器内还装有多种工作软件，如：自测试软件、卫星预报软件、导航电文解码软件、GPS 单点定位软件等。

4)微处理器

微处理器是 GPS 接收机工作的灵魂，GPS 接收机工作都是在微机指令统一协同下进行的。其主要工作步骤为：

①接收机开机后首先对整个接收机工作状况进行自检，并测定、校正、存贮各通道的时延值。

②接收机对卫星进行搜索，捕捉卫星。当捕捉到卫星后即对信号进行跟踪，并将基准信号译码得到 GPS 卫星星历。当同时锁定 4 颗卫星时，将 C/A 码伪距观测值连同星历一起计算测站的三维坐标，并按预置位置更新率计算新的位置。

③根据机内存贮的卫星历书和测站近似位置，计算所有在轨卫星升降时间、方位和高度角。

④根据预先设置的航路点坐标和测站单点定位位置计算导航的参数(如：航偏距、航偏角、航行速度等)。

⑤接收用户输入信号，如：测站名、测站号、作业员姓名、天线高、气象参数等。

5)显示器

GPS 接收机都有液晶显示屏以提供 GPS 接收机工作信息，并配有一个控制键盘。用户可通过键盘控制接收机工作。对于导航接收机，有的还配有大显示屏，在屏幕上直接显示导航的

信息甚至显示数字地图。

(3)电源

GPS接收机电源有两种，一种为内电源，一般采用锂电池，主要用于RAM存贮器供电，以防止数据丢失。另一种为外接电源，这种电源常用可充电的12 V直流镉镍电池组，或采用汽车电瓶。当用交流电时，要经过稳压电源或专用电流交换器。

综上所述，接收机的主要任务是：当GPS卫星在用户视界升起时，接收机能够捕捉到按一定卫星高度截止角所选择的待测卫星，并能够跟踪这些卫星的运行；对所接收到的GPS信号，具有变换、放大和处理的功能，以便测量出GPS信号从卫星到接收天线的传播时间，解译出GPS卫星所发送的导航电文，实时地计算出测站的三维位置，甚至三维速度和时间。GPS信号接收机不仅需要功能较强的机内软件，而且需要一个多功能的GPS数据测后处理软件包。接收机加处理软件包，才是完整的GPS信号用户设备。

4 GPS定位的基本原理

GPS的定位原理，简单地来说，是利用几何与物理的一些基本原理，利用空间分布的卫星以及卫星与地面点间距离交会出地面点位置的方法。因此若假定卫星的位置为已知，通过一定的方法我们又准确测定出地面点 A 至卫星间的距离，那么 A 点一定位于以卫星为中心、以所测得距离为半径的圆球上。若我们能同时测得点 A 至另两颗卫星的距离，则该点一定处在三圆球相交的两个点上。根据地理知识，我们很容易确定其中一个点是我们所需要的点。从测量的角度看，则相似于测距后方交会。在以上假设下，即已知卫星位置又已同时测定到三颗卫星的距离，即可进行定位。但由于GPS卫星是分布在20000多公里高空的运动载体，只能是在同一时间测定三个距离才可定位，要实现同步必须具有统一的时间基准，从解析几何角度出发，GPS定位包括确定一个点的三维坐标与实现同步四个未知参数，因此必须通过测定到至少4颗卫星的距离才能定位。由此可见，要实现精确定位，必须解决以下两个问题：(1)在某一时刻确定卫星的准确位置；(2)准确测定卫星至地球上我们所在地点的距离。第一个问题在第3章已经解决，关键是如何测定距离。

距离测量主要采用两种方法：一是测量GPS卫星发射的测距码信号到达用户接收机的传播时间，即伪距测量；一是测量具有载波多普勒频移的GPS卫星载波信号与接收机产生的参考载波信号之间的相位差，即载波相位测量。通过对4颗或4颗以上的卫星同时进行伪距或相位的测量即可推算出接收机的三维位置。

GPS定位根据测距的原理与方法不同，分为伪距法定位与载波相位测量定位。采用伪距观测量定位速度最快，而采用载波相位观测量定位精度最高。对于地面点接收机而言，根据其运动状态可将GPS定位分为静态定位和动态定位，静态定位是指将接收机安置在固定不动的待定点上观测数分钟或更长时间，以确定该点的三维坐标，又称为绝对定位。若将两台或更多台接收机置于不同点上，通过一段时间的观测确定点间的相对位置关系，称为相对定位。动态定位是指至少有一台接收机处于运动状态，确定各观测时刻运动中的接收机的绝对或相对位置关系。

利用伪距测量与相位测量均可进行定位，本章首先讨论伪距测量的原理与相位测量的原理方法，然后讨论GPS相对定位，最后阐述载波相位测量中周跳的探测与修复和整周模糊度的求解。

4.1 伪距测量

4.1.1 伪距的概念

通过测量GPS卫星发射的测距码信号到达用户接收机的传播时间，从而求算出接收机到卫星的距离，即

$$\rho' = \Delta t \cdot c \tag{4.1}$$

式中：Δt——传播时间；

c——光速。

由于卫星钟与接收机钟的误差以及信号在传播过程中经过电离层和对流层的延迟，由以上公式求出的距离并不代表卫星与接收机的几何距离 ρ，与其存在偏差，因此称以上距离 ρ' 为伪距，它是伪距定位法的观测量。它与 ρ 的关系可用下式表示：

$$\rho = \rho' - \delta\rho_1 - \delta\rho_2 - c\delta t_k + c\delta t^j \tag{4.2}$$

式中：$\delta\rho_1$、$\delta\rho_2$——电离层与对流层的改正项；

δt_k——接收机时钟相对于标准时间的偏差；

δt^j——卫星时钟相对于标准时间的偏差。

根据对不同的码相位进行测量得出不同的伪距可分为 C/A 码伪距、P 码伪距。C/A 码伪距精度约为 20m 左右，P 码伪距精度约为 2m 左右。

4.1.2 伪距测量

伪距定位法是根据 GPS 接收机在某一时刻同时量测的到至少 4 颗卫星的伪距以及卫星的位置，采用距离交会的方法求定接收机位置的方法。因此最关键的是进行伪距测量，其基本过程是：GPS 卫星依据自己的时钟发出某一结构的测距码，该码通过一定时间 τ 到达接收机。同时接收机依据本身的时钟也产生一组结构完全相同的测距码，也叫复制码，并通过时延器使其延迟一定时间，将延迟后的测距码与接收到的测距码进行相关运算处理，通过测量相关函数的最大值位置来测定卫星信号的传播延迟，从而计算出卫星到接收机的距离。P 码与 C/A 码具有良好的自相关和互相关特性，在低电平情况下可以检测，具有较强的抗干扰能力，且信号功率小、保密性好、无模糊度等优点。

图 4.1 为伪距测量的原理图。GPS 卫星发射的测距码 $S(t)$ 从卫星天线发射，穿过电离层、对流层经时间延迟 τ 到达接收机天线。接收机于 T 时刻接收到的卫星信号 $S(t-\tau)$。接收机产生的与卫星发射的测距码相同的本地码为 $S(t+\delta t)$，δ_t 为接收机与卫星钟差。经码移位电路可将本地码移位 τ' 得到 $S(t+\delta t-\tau')$，送入相关器与接收到的卫星信号进行相关处理，积分得出相关输出为：

$$R(S\tau) = \int S(t-\tau)S(t+\delta t-\tau')\mathrm{d}t \tag{4.3}$$

式中：$\Delta\tau = (t+\delta t-\tau') - (t-\tau)$

调整移位 τ' 使相关输出为最大。这时根据测距码自相关的特性得：

$$\tau' = t + \delta t - nT \tag{4.4}$$

式中：T——测距码周期；

n——整周数，$n = 1,2,3,\cdots\cdots$。

因此有：

$$\rho' = c\tau' = \rho + c\delta t - n\lambda \tag{4.5}$$

式中：λ——测距码波长。

式(4.5)即为伪距测量的基本观测方程。式中 $n\lambda$ 为测距模糊度。当测距码的波长小于测定的距离时，存在测距模糊度的问题。采用 P 码测量时，其波长远大于待测距离，因此 $n=0$，此时，$\rho' = \rho + c\delta t$。用 C/A 测距，其波长大约为 300km，此时存在测距模糊度问题，但如果已知精确度高于 300km 的接收机到卫星的概略距离，即可确定测距模糊度，这时 $\rho' = c(\tau' + nT)$，因此可等同于：$\rho' = \rho + c\delta t$

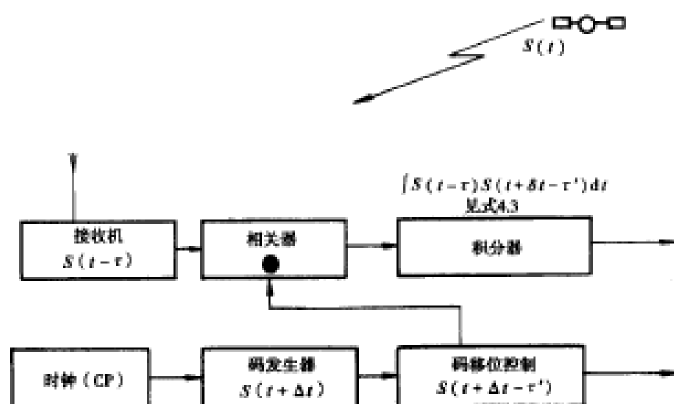


图 4.1 伪距测量原理图

可见伪距观测量等于待测距离与钟差(包括卫星钟差与接收机钟差)等效距离之和。若能精确求出接收机与卫星钟相对于 GPS 基准时间的偏差，即可通过 δt 对伪距进行修正，求得准确的卫星到接收机的距离。在实际应用中，卫星钟差包含在导航电文中，为已知值，而接收机钟差未知，在定位计算中作为未知参数与点的位置一同解算，这也正是 GPS 定位为什么必须接收多于 4 颗卫星的原因。若再考虑信号穿过电离层与对流层时其速度发生变化，就必须加上电离层与对流层影响的改正。

4.1.3 伪距法绝对定位原理

以上论述了 GPS 伪距码测距的基本原理与方法，其实质是通过码相关技术求定卫星信号到达接收机的时间延迟 τ'，从而求出卫星到达接收机的距离。为了说明问题的方便，引入以下时间符号：T 表示 GPS 标准时，作为基准时，t^j 表示卫星 j 的钟面时间，t_k 表示接收机 k 的钟面时间，δt^j、δt_k 分别表示卫星钟与接收机钟相对于 GPS 标准时的偏差：

$$t^j = T^j + \delta t^j \tag{4.6}$$

$$t_k = T_k + \delta t_k \tag{4.7}$$

设卫星 j 在卫星钟 t^j 时刻发射的信号，接收机于接收机时刻 t_k 接收到该信号，则通过码相关处理得：

$$\begin{aligned}\tau' &= t_k - t^j \\ &= (T_k + \delta t_k) - (T^j + \delta t^j) = (T_k - T^j) + (\delta t_k - \delta t^j) = \tau + \delta t_k - \delta t^j\end{aligned} \tag{4.8}$$

两边同乘以 c 即为伪距：$\rho' = \rho + c\delta t_k - c\delta t^j$ (4.9)

ρ 为卫星 j 到接收机 k 的几何距离，可用位于同一坐标系的卫星与接收机的空间直角坐标表示为：

$$\rho = \sqrt{[X^j(t^j) - X_k(t_k)]^2 + [Y^j(t^j) - Y_k(t_k)]^2 + [Z^j(t^j) - Z_k(t_k)]^2} \tag{4.10}$$

代入式(4.9)即为伪距定位的基本模型：

$$\rho' = \sqrt{[X^j(t^j) - X_k(t_k)]^2 + [Y^j(t^j) - Y_k(t_k)]^2 + [Z^j(t^j) - Z_k(t_k)]^2} + c\delta t_k - c\delta t^j \tag{4.11}$$

由于在 GPS 测量中只能获得接收机时刻 t_k，卫星发射时刻 t^j 只能通过 τ' 反求。然后根据

广播星历计算 t^j 时刻卫星的位置$[X^j(t^j),Y^j(t^j),Z^j(t^j)]$。可见在式(4.11)中，$\rho'$ 为伪距观测量，ρ 中包括接收机的位置$[X_k(t_k),Y_k(t_k),Z_k(t_k)]$三个未知参数，$\delta t^j$ 卫星钟差包含在导航电文中为已知，接收机钟差 δt_k 未知，作为未知参数，共4个未知参数。当在 t_k 时刻接收到4颗以上卫星，则可列出四个方程，从而求解出四个未知参数。图4.2为GPS伪距定位的原理图。将GPS接收机的钟差作为未知参数一是可以大大降低GPS接收机的成本，另外还实现了GPS定时的功能。

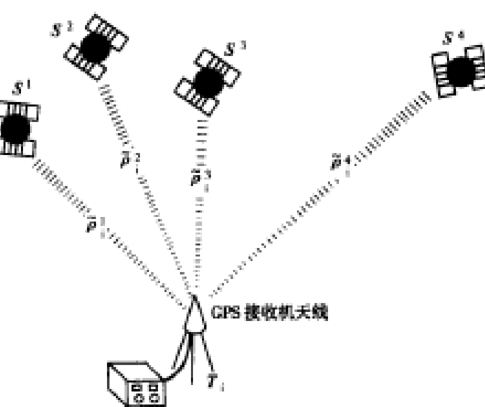


图4.2 伪距定位原理图

为了提高GPS的定位精度，在实际定位模型中应考虑电离层、对流层的影响，其影响可采用一些比较成熟的模型加以改正，因此可以认为是已知量。当在某时刻观测卫星的个数 j 大于等于4时，可采用间接平差法计算接收机的位置坐标的最或然值。

首先根据待定点的近似坐标$[X_k^0,Y_k^0,Z_k^0]$对式(4.11)进行线性化(用泰勒级数展开)得：

$$v_k^j = a_k^j\delta X_k + b_k^j\delta Y_k + c_k^j\delta Z_k + \delta\rho + (\rho_{k0}^j + \delta\rho_{ion} + \delta\rho_{trop} - c\delta t^j - \rho') \tag{4.12}$$

式中：$a_k^j = -\dfrac{X^j - X_k^0}{\rho_0^j}$，$b_k^j = -\dfrac{Y^j - Y_k^0}{\rho_0^j}$，$c_k^j = -\dfrac{Z^j - Z_k^0}{\rho_0^j}$，$\delta\rho = c\delta t_k$。

令 $l_k^j = -(\rho_{k0}^j + \delta\rho_{ion} + \delta\rho_{trop} + c\delta t^j - \rho')$，$j=1,2,3,4$，则式(4.12)写成矩阵的形式为：

$$V = \begin{bmatrix} v_k^1 \\ v_k^2 \\ v_k^3 \\ v_k^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_k^1 & b_k^1 & c_k^1 & 1 \\ a_k^2 & b_k^2 & c_k^2 & 1 \\ a_k^3 & b_k^3 & c_k^3 & 1 \\ a_k^4 & b_k^4 & c_k^4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X_k \\ \delta Y_k \\ \delta Z_k \\ \delta\rho_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_k^1 \\ l_k^2 \\ l_k^3 \\ l_k^4 \end{bmatrix} = AX - L = 0 \tag{4.13}$$

当同时观测的卫星数等于4时，可求出未知参数的惟一解：

$$X = A^{-1}L \tag{4.14}$$

当同时观测的卫星数大于4时，可用最小二乘法求解：

$$X = (A^TA)^{-1}A^TL \tag{4.15}$$

$$[X_k = X_k^0 + \delta X_k, Y_k = Y_k^0 + \delta Y_k, Z_k = Z_k^0 + \delta Z_k] \tag{4.16}$$

精度为：

$$D_X = \sigma_0^2 Q_X = m_0^2(A^TA)^{-1} \tag{4.17}$$

式中：σ_0——伪距测量中误差。

在实际应用过程中，有时因为给定的测站点的近似坐标偏差较大，为了弥补由于线性化过程中略去二次及二次以上项对平差结果的影响，往往采用迭代法求解。

由此可见，接收机只要同时接收到4颗以上卫星即可定出接收机的位置$[X_k,Y_k,Z_k]$，因此可实时定位。由于卫星的位置为WGS—84坐标系下的坐标，因此求得的接收机位置坐标也是WGS—84坐标系下的坐标，根据大地坐标的正反算公式可将其转化为大地经纬度坐标。

由于利用该方法定位只涉及到一个地面点，而且其坐标是相对于世界协议坐标系的坐标，因此称该方法的定位为伪距单点定位或绝对定位。伪距单点定位的精度约为30米左右。

按定位方式不同，GPS定位可分为单点定位和相对定位（差分定位）两种。单点定位就是根据一台接收机的观测数据来确定接收机位置的方式，它只能采用伪距观测量，可用于车船等的概略导航定位。相对定位（差分定位）是根据两台以上接收机的观测数据来确定观测点之间的相对位置的方法，它既可采用伪距观测量也可采用相位观测量，大地测量或工程测量均应采用相位观测值进行相对定位。

在GPS观测量中包含了卫星和接收机的钟差、大气传播延迟、多路径效应等误差，在定位计算时还要受到卫星广播星历误差的影响，在进行相对定位时大部分公共误差被抵消或削弱，因此定位精度将大大提高，双频接收机可以根据两个频率的观测量抵消电离层误差的主要部分，在精度要求高，接收机间距离较远时，应选用双频接收机。

由此可见，伪距单点定位既可用于静态定位，也可用于动态定位。对于动态定位由于精度较低只能用于精度要求不高的导航。静态定位观测时间越长，取得的数据越多，多余观测数越多，精度有所提高。

4.1.4 伪距单点定位的精度估算

由式(4.17)不难看出，定位的精度除了与观测量的精度有关外，还取决于设计矩阵 A，而 A 矩阵是由观测矢量的方向余弦构成，在地面点一定情况下，与所观测的卫星的几何位置有关，因此说GPS定位的精度与卫星的分布有关，在GPS观测处理时应对观测卫星进行选择。

为了纯量地表示卫星的几何图形结构对定位精度的影响，引入以下几个精度因子的概念：

(1)三维几何精度因子PDOP

由式(4.17)，不难求出单点定位的精度：

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} = \sigma_0 \sqrt{Q_{XX} + Q_{YY} + Q_{ZZ}} = \sigma_0 \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}} \qquad (4.18)$$

令

$$\text{PDOP} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}} \qquad (4.19)$$

因此有：$\sigma_p = \sigma_0$PDOP。观测定位的精度取决于观测量的精度与几何精度因子。

(2)时钟精度因子TDOP

与后方交会不同，在伪距法定位中接收机钟差作为未知参数参与平差，以减弱接收机钟差的影响。钟差的确定精度直接关系到定位精度。采用 Q_X 的第四个对角线元素表示时钟精度因子TDOP。即：TDOP $= \sqrt{Q_{44}}$，因此有

$$\sigma_T = \sigma_0 \text{TDOP} \qquad (4.20)$$

(3)高程精度因子VDOP

表征定位点在垂直位置的精度可用高程精度因子。

$$\text{VDOP} = \sqrt{Q_{33}}, \sigma_V = \sigma_0 \text{VDOP} \qquad (4.21)$$

(4)平面位置精度因子HDOP

表征定位点在平面位置的精度可用平面位置精度因子表示。

$$\text{HDOP} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22}} = \sqrt{Q_{XX} + Q_{YY}}, \sigma_H = \sigma_0 \text{HDOP} \qquad (4.22)$$

(5)几何精度因子GDOP

综合考虑空间位置及钟差对定位结果的影响，可用几何精度因子GDOP表征：

$$GDOP = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33} + Q_{44}} = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2} \tag{4.23}$$

由上可知，几何精度因子就是接收卫星的几何形状对定位精度影响的大小程度。在相同的观测精度下，几何精度因子越小定位精度越高，反之越低。因此在 GPS 观测时，应选择几何精度因子最小的卫星组进行观测，以获取较高的精度。为了达到一定的精度，在观测时应对几何精度因子加以限制。在 GPS 测量规范中，不同等级的 GPS 测量对 GDOP 都有相应的限差要求。为此各种 GPS 数据处理软件都在星历预报模块中，包含对精度因子的预报，以此为根据可进行作业计划的安排，由于 GDOP 全面地衡量了卫星的几何位置及钟差对定位的影响，因此在实际作业中常对 GDOP 加以限制，以选择合理的卫星分布与观测时段。

4.2 载波相位测量

伪距测量的测距精度一般达到一码元宽度的 1/100，对于 P 码约为 29cm，C/A 码为 2.9m，正是由于其测距精度较低，其定位精度也较低。特别由于美国政府对 P 码保密，民用伪距定位只能采用 C/A 码，定位精度不能满足测量的需要。而包含在 GPS 卫星信息中的载波频率，$L_1 = 1575.42\text{MHz}$，$L_2 = 1227.60\text{MHz}$，其相应波长，$\lambda_1 = 19.03\text{cm}$，$\lambda_2 = 24.42\text{cm}$。由此可见相位测量的精度要比伪距测量的精度高得多。因此目前测地型 GPS 接收机普遍利用载波相位测量。相位测量的精度可达 1～2mm，其相对定位精度可达 10^{-8}。

由于载波信号是一种周期性的正弦波，而相位测量只能测量出不足一周的小数部分，因此在相位测量中存在整周数的确定问题，也就是整周模糊度的精确求解问题。由于受各种误差的影响，往往使整周数的整周性发生变化，如何正确快速求解整周模糊度问题是相位测量定位的关键，该部分内容将在第 4.5 节加以详细介绍。

4.2.1 载波相位测量的原理

载波相位测量是测量 GPS 载波信号从 GPS 卫星发射天线到 GPS 接收机接收天线的传播路程上的相位变化，从而确定传播距离的方法。

如图 4.3，卫星 j 发射一载波信号，在时刻 t 的相位为 $\varphi^j(t)$，该信号经过距离 ρ 到达接收机，其相位为 φ_k，相位变化 $(\varphi^j - \varphi_k)$ 为其相位变化量，现 $(\varphi^j - \varphi_k)$ 中包含整周部分与不足整周部分。由于载波信号是一种周期性的正弦波，因此若能测定 $(\varphi^j - \varphi_k)$，则可计算出卫星到接收机间的距离：

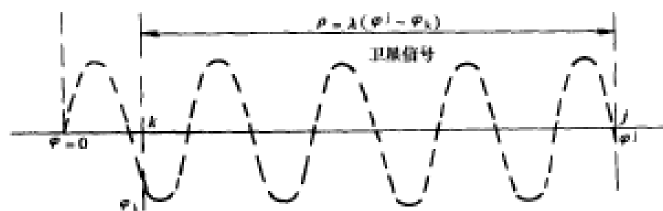


图 4.3 载波相位测量示意图

$$\rho = \lambda \cdot (\varphi^j - \varphi_k) = \lambda \cdot (N_0 + \Delta\varphi) \tag{4.24}$$

式中：相位以周为单位，N_0 为整周部分，$\Delta\varphi$ 为非整周部分，λ 为载波波长。

在实际应用中，该法是不能实现的，因为 φ^j 无法测定。为此采用比相的方法，即 GPS 接收机

振荡器产生一个频率和初相均与卫星载波完全相同的基准信号，而要测定的某一时刻的相位差即为接收机产生的基准信号与接收的卫星载波相位之差。图 4.4 为载波相位测量的原理图。

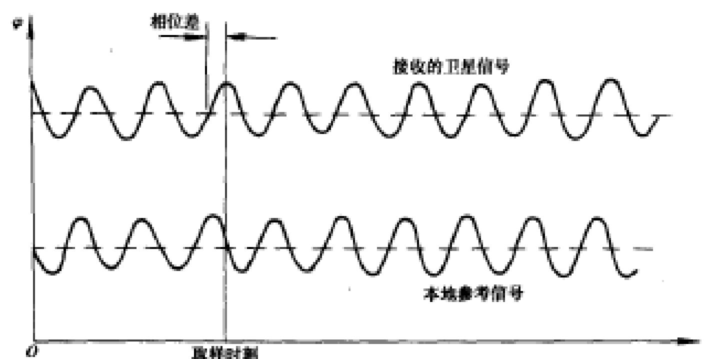


图 4.4　载波相位测量原理图

在某一时刻 t_i，卫星信号的相位等于本机振荡器产生的基准相位：$\Phi_k(t_i)=\varphi^j(t_i)$；相同时刻接收的 GPS 卫星信号的载波相位为 $\varphi_k(t_i)$，则：

$$\Delta\varphi=\varphi^j(t_i)-\varphi_k(t_i)=\Phi_k(t_i)-\varphi_k(t_i) \tag{4.25}$$

因此，信号传播距离为：

$$\rho=\Delta\varphi\cdot\lambda=[(\Phi_k(t_i)-\varphi_k(t_i)]\lambda \tag{4.26}$$

由于卫星与地球间的相对运动，接收的卫星信号的频率因多普勒频移而发生变化，与基准信号频率不同。将接收的卫星信号与产生的基准信号混频，得到差频的中频信号，其相位值即为两个信号间的相位差。因此通过测定该中频信号的相位便可获得所需的相位差。

4.2.2　载波相位测量的观测值

以上介绍了载波相位测量的原理，下面介绍相位测量的观测值。

(1)任一历元的载波相位差及其观测值

由于在 GPS 信号中，在载波上调制了二进制码(测距码和导航电文)，在载波相位测量之前首先进行解调工作，采用码相关技术或平方解调技术来恢复接收到的载波信号，称为重建载波。码相关技术可以在恢复载波的同时获取测距信号与卫星电文，但缺点是必须知道码结构。而平方解调技术只能获得载波信号，而不需要知道测距码的结构。

任一历元的相位观测值是指某一指定时刻的载波相位差，即：接收机本机产生的基准载波信号与接收到的卫星信号的相位差。设接收机 k 在第 i 个观测历元，对应接收机钟面时 t_k^i 接收到卫星 j 的载波信号相位为：$\phi_k^j(t_k^i)$，它等于对应于 t_k^i 的发射时刻 t_j^i(卫星钟面时)的载波相位 $\phi^j(t_j^i)$，对应 t_k^i 时接收机产生的基准信号相位为 $\varphi_k(t_k^i)$，则第 i 个历元的相位差为：

$$\bar{\varphi}_k^j(i)=\phi_k(t_k^i)-\phi_k^j(t_k^i)=\phi_k(t_k^i)-\phi^j(t_k^i) \tag{4.27}$$

以周计，则为：

$$\bar{\varphi}_k^j(i)=N_k^{*j}(i)+\Delta\varphi_k^j(i) \tag{4.28}$$

当接收机跟踪到卫星信号后，称为初始历元，$i=1$，则有：

$$\bar{\varphi}_k^j(1)=N_k^{*j}(1)+\Delta\varphi_k^j(1) \tag{4.29}$$

其实在实际观测中，不论是初始历元，还是任一历元 i，接收机所测的相位值只有 $\Delta\varphi_k^j(i)$

或 $\Delta\varphi_k^j(1)$。而 $N_k^{*j}(i)$ 或 $N_k^{*j}(l)$ 为未知量。

令第一个历元的相位观测值为：

$$\varphi_k^j(1)=\tilde{N}_k^j(1)+\Delta\varphi_k^j(1) \tag{4.30}$$

式中 $\tilde{N}_k^j(1)$ 是接收机在初始历元给出的一个任意整数，它不同于正确的 $N_k^{*j}(1)$。在初始历元后，只要接收机能连续跟踪卫星，则此后的相位差变化整周数可由整周计数器正确地记录下来。任一历元的相位观测值为：

$$\varphi_k^j(i)=\tilde{N}_k^j(i)+\Delta\varphi_k^j(i) \tag{4.31}$$

由于 $\tilde{N}_k^j(1)$ 不正确，从而导致 $\tilde{N}_k^j(i)$ 也不正确。因此该不正确值是由于 $\tilde{N}_k^j(1)$ 不正确引起的。设定 $\tilde{N}_k^j(1)$、$\tilde{N}_k^{*j}(1)$ 相差 $N_k^j(1)$，则 $\tilde{N}_k^j(i)$ 与 $\tilde{N}_k^{*j}(i)$ 也相差 $N_k^j(1)$ 称之为初始整周模糊度。令：

$$\tilde{N}_k^j(1)-N_k^{*j}(1)=N_k^j(1) \tag{4.32}$$

则

$$\tilde{N}_k^j(i)=N_k^{*j}(i)-N_k^{*j}(1)+\tilde{N}_k^j(1)=N_k^{*j}(i)+N_k^j(1) \tag{4.33}$$

相位观测值：

$$\begin{aligned}\varphi_k^j(i)&=\tilde{N}_k^j(i)+\Delta\varphi_k^j(i)=N_k^{*j}(i)+\Delta\varphi_k^j(i)+N_k^j(1)\\&=\tilde{\varphi}_k^j(i)+N_k^j(1)=\phi_k(t_k^j)-\phi_k^j(t_k^j)+N_k^j(1)\end{aligned} \tag{4.34}$$

图 4.5 进一步说明了任一历元的相位观测值。

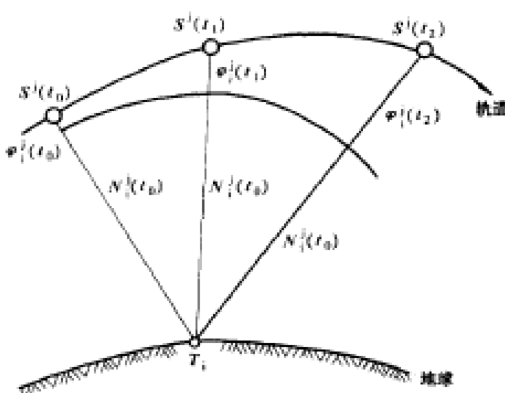


图 4.5 任一历元的相位观测值

由上可知，$N_k^j(1)$ 是初始历元的整周待定值，称为初始整周模糊度，也叫整周未知数。但一旦卫星失锁，即使立即恢复，由于失锁前后的接收机的整周计数不再连续，恢复跟踪的第一个历元起，又将产生一个新的整周计数。

(2)载波相位测量的观测方程

以上论述的均是在理想状态下，既没有考虑卫星钟与接收机钟的误差，另外也没有考虑信号传播介质的影响。因此有必要建立实际的载波相位观测值方程。

设在 GPS 标准时 T 时刻，卫星 j 发射的载波相位为 $\varphi^j(T)$，经传播延迟 $\tau_k^j(T)$ 后到达接收机 k，反过来，接收机 k 在接收机钟面时刻 t 所接收的卫星 j 的载波相位 $\varphi_k^j(t_k)$ 就是卫星 j 在 GPS 标准时刻 T 的载波相位 $\varphi^j(T)$。

$$\varphi_k^j(t_k)=\varphi^j(T) \tag{4.35}$$

考虑到接收机钟差，有：

$$t_k-\delta t_k=T+\tau_k^j(T) \tag{4.36}$$

$$T^j=t_k-\delta t_k-\tau_k^j(T) \tag{4.37}$$

式中 δt_k 为接收机钟差，代入式(4.34)，根据式(4.1)有：

$$\tau_k^j(T)=\frac{1}{c}\rho_k^j(T_k,T^j)=\frac{1}{c}\rho_k^j[t_k-\delta t_k,t_k-\delta t_k-\tau_k^j(T)] \tag{4.38}$$

在 t_k^j 处按 Taylor 级数展开：

$$\tau_k^i(T)=\frac{1}{c}\rho_k^i[t_k,t_k-\tau_k^i(T)]-\frac{1}{c}\dot{\rho}_k^i[t_k^i,t_k^i-\tau_k^i(T)]\delta t_k^i \tag{4.39}$$

式中：$\dot{\rho}_k^i$——卫地距变率。

由式(4.39)可用迭代法求出 $\tau_k^i(T)$，当顾及对流层、电离层的影响时，$\tau_k^i(T)$中还包含了其对应的延迟 $\Delta\tau_{trop}$、$\Delta\tau_{ion}$。因此有：

$$\tau_k^i=\Delta\tau_k^i+\Delta\tau_{trop}+\Delta\tau_{ion} \tag{4.40}$$

式中：$\Delta\tau_k^i$——几何延迟；

$\Delta\tau_{trop}$——对流层延迟；

$\Delta\tau_{ion}$——电离层延迟。

与接收时刻 $t_k^i-\delta t_k^i$ 相对应的发射时刻为 $t_j^i-\delta t_j^i=t_k^i-\delta t_k^i-\Delta\tau_k^{ij}-\Delta\tau_{trop}^i-\Delta\tau_{ion}^i$。由式(4.34)有：

$$\varphi_k^i(i)=\phi_k(t_k^i)-\phi_k^i(t_j^i)+N_k^i(1) \tag{4.41}$$

由于相位量度的连续性

$$\phi_k(t_k^i)=\phi_k(t_k^1)+\int_{t_k^1}^{t_k^i}\frac{\mathrm{d}[\varphi(t_k)]}{\mathrm{d}t_k}\mathrm{d}t \tag{4.42}$$

即：接收机振荡器产生的基准相位。对于较稳定的振荡器应该有：

$$\phi_k(t_k^i)=\phi_k(t_k^1)+f(t_k^i-t_k^1) \tag{4.43}$$

同理对于卫星发射信号：

$$\phi^j(t_j^i)=\phi^j(t_k^1)+f(t_k^i-\delta t_k^i-\Delta\tau_k^{ij}-\Delta\tau_{trop}^i-\Delta\tau_{ion}^i+\delta t_j^i-t_k^1) \tag{4.44}$$

$$\begin{aligned}\Delta\tau_k^{ij}&=\frac{1}{c}\rho_k^i(t_k^i,t_k-\tau_k^{ij})-\frac{1}{c}\dot{\rho}_k^i(t_k^i,t_k^i-\tau_k^i)\delta t_k^i\\&=\frac{1}{c}\rho_k^i(t_i)-\frac{1}{c}\dot{\rho}(t_i)\delta t_k^i\end{aligned} \tag{4.45}$$

将之代入式(4.44)，并代入式(4.34)有：

$$\begin{aligned}\varphi_k^i(i)=&\phi_k(t_1)-\varphi^j(t_1)+\frac{f}{c}\rho_k^i(t_i)-f\delta t_j^i\\&+f\left[1-\frac{1}{c}\dot{\rho}_k^i(t_i)\right]\delta t_k^i+f\Delta\tau_{trop}^i+f\Delta\tau_{ion}^i+N_k^i(1)\end{aligned} \tag{4.46}$$

式中对流层改正数 $f\Delta\tau_{trop}^i$可采用一些比较成熟的模型利用地面实测气象资料进行改正，电离层改正 $f\Delta\tau_{ion}^i$可用双频观测获得。GPS卫星钟为高精度的原子钟，其改正模型的参数包含在导航电文中，可以达到足够的精度，因此在一般的应用中，常不顾及该项。而式(4.46)中的前两项为初始历元的接收机在钟面时刻 t_1 时的相位。设 $\mathrm{d}t_k^i$ 表示初始历元相对于卫星的钟差，则：

$$\phi_k(t_1)-\varphi^j(t_1)=f\mathrm{d}t_k^i \tag{4.47}$$

代入式(4.46)并略去卫星钟差项，有：

$$\varphi_k^i(i)=\frac{f}{c}\rho_k^i(t_i)+f\left[1-\frac{1}{c}\dot{\rho}_k^i(t_i)\right]\delta t_k^i+f\Delta\tau_{trop}^i+f\Delta\tau_{ion}^i+f\mathrm{d}t_k^i+N_k^i(1) \tag{4.48}$$

式(4.48)即为相位测量的基本方程。在式(4.48)中，含有卫星至接收机的距离及其变率，因此式(4.48)也就建立了与卫星及接收机的位置信息之间的关系。

设式(4.48)以周为单位，将两边同乘以 $\lambda=\frac{c}{f}$ 则有：

$$\rho'^{j}_{k}(i) = \lambda \cdot \varphi^{j}_{k}(i) = \rho^{j}_{k}(t_i) + c\left[1 - \frac{1}{c}\dot{\rho}^{j}_{k}(t_i)\right]\delta t^{j}_{k} + c\Delta\tau^{j}_{\mathrm{trop}} + c\Delta\tau^{j}_{\mathrm{ion}} + c\mathrm{d}t^{j}_{k} + \lambda N^{j}_{k}(1) \tag{4.49}$$

式(4.49)称为测相伪距观测方程，该式与测距码伪距观测方程相比，在忽略卫星钟差情况下，就多了一项载波整周数。式中的$\frac{1}{c}\dot{\rho}^{j}_{k}(t_i)$对距离影响很小，在相对定位中，若基线较短（< 10km）则可忽略该项，以简化公式。但在相对定位中，如果基线较长，则必须使用严密的计算公式。

设在观测历元 t_i 卫星 j 在 WGS—84 坐标下的坐标为$[X^j(t_i)\ Y^j(t_i)\ Z^j(t_i)]$；接收机 k 在 WGS—84 坐标下的坐标为$[X_k(t_i)\ Y_k(t_i)\ Z_k(t_i)]$；取坐标近似值分别为：$[X^j_0(t_i)\ Y^j_0(t_i)\ Z^j_0(t_i)]$、$[X^0_k(t_i)\ Y^0_k(t_i)\ Z^0_k(t_i)]$，坐标改正数为：$[\delta X^j(t_i)\ \delta Y^j(t_i)\ \delta Z^j(t_i)]$、$[\delta X_k(t_i)\ \delta Y_k(t_i)\ \delta Z_k(t_i)]$，

令

$$\begin{aligned} a^{j}_{k}(t_i) &= -\frac{f}{c}\frac{X^j_0(t_i) - X^0_k(t_i)}{\rho^{j}_{k0}(t_i)} \\ b^{j}_{k}(t_i) &= -\frac{f}{c}\frac{Y^j_0(t_i) - Y^0_k(t_i)}{\rho^{j}_{k0}(t_i)} \\ c^{j}_{k}(t_i) &= -\frac{f}{c}\frac{Z^j_0(t_i) - Z^0_k(t_i)}{\rho^{j}_{k0}(t_i)} \end{aligned} \tag{4.50}$$

式中：$\rho^{j}_{k0} = \sqrt{[(X^j_0(t_i) - X^0_k(t_i)]^2 + [Y^j_0(t_i) - Y^0_k(t_i)]^2 + [Z^j_0(t_i) - Z^0_k(t_i)]^2}$，误差方程为：

$$V^{j}_{k}(i) = [-a^{j}_{k}(t_i), -b^{j}_{k}(t_i), -c^{j}_{k}(t_i), a^{j}_{k}(t_i), b^{j}_{k}(t_i), c^{j}_{k}(t_i)]\begin{bmatrix}\delta X^j(t_i)\\ \delta Y^j(t_i)\\ \delta Z^j(t_i)\\ \delta X_k(t_i)\\ \delta Y_k(t_i)\\ \delta Z_k(t_i)\end{bmatrix}$$

$$+ f\delta t^{j}_{k} + f\mathrm{d}t^{j}_{k} + N^{j}_{k}(1) + f\Delta\tau^{j}_{\mathrm{trop}} + f\Delta\tau^{j}_{\mathrm{ion}} - \varphi^{j}_{k}(i) + \frac{f}{c}\rho^{j}_{k0}(t_i) \tag{4.51}$$

该式顾及了卫星坐标的误差，因此利用该项可以估算卫星轨道误差对测相的影响，也可以利用该式进行考虑轨道改进的方法进行精密定位。

(3)载波相位测量绝对定位

在式(4.51)中，将右端第二、三项合并为接收机钟差的影响，而最后四项合并为常数项 $-L^{j}_{k}(t_i)$，并考虑卫星坐标可通过星历文件计算而得到，有：

$$V^{j}_{k}(i) = [a^{j}_{k}(t_i), b^{j}_{k}(t_i), c^{j}_{k}(t_i)]\begin{bmatrix}\delta X_k(t_i)\\ \delta Y_k(t_i)\\ \delta Z_k(t_i)\end{bmatrix} + f\delta t_k(t_i) + N^{j}_{k}(1) - L^{j}_{k}(t_i) \tag{4.52}$$

可见在一个历元的观测方程中，含有三个接收机的坐标未知参数，一个初始整周模糊度，一个接收机钟差。对于一个接收机若同时可接收 j 个卫星信号，则有 $4+j$ 个未知参数，若采用一个历元观测 j 个卫星，可列出 j 个观测方程但却含有 $4+j$ 个未知参数。显然即使观测卫星数大于 4 也无法利用 1 个历元进行定位，也就是说载波相位定位法不能实时定位。

当在一个测站上进行静态定位，可观测多个历元 $t_i(i=1,2\cdots\cdots n)$。此时测站坐标改正数不随时间而变化，保持3个未知参数。$\delta t_k(t_i)$随历元不同而发生变化，为此一般用一个二阶或三阶的多项式来描述。即：$\delta t_k(t_i)=a_0+a_1(t_i-t_0)+a_2(t_i-t_0)^2$，$t_0$ 为选定的参考时刻。式(4.52)变为：

$$V_k^j(i)=[a_k^j(t_i),b_k^j(t_i),c_k^j(t_i)]\begin{bmatrix}\delta X_k(t_i)\\ \delta Y_k(t_i)\\ \delta Z_k(t_i)\end{bmatrix}+f[a_0+a_1(t_i-t_0)+a_2(t_i-t_0)^2]+N_k^j(1)-L_k^j(t_i) \tag{4.53}$$

若观测 n 个历元，每个历元观测 m 颗卫星，则共有 mn 个观测值。未知参数包含三个坐标改正数，三个接收机钟差参数以及 m 个整周模糊度，共有$(6+m)$个未知数。为了求解 $6+m$ 个未知参数，则必须满足：$mn\geqslant 6+m$，即：

$$n\geqslant\frac{6+m}{m}=\frac{6}{m}+1$$

当 $m=4$ 时，可得 $n\geqslant 2$，即要观测3个历元才能进行绝对定位。将 mn 个方程写成矩阵的形式：

$$V=AX-L$$

$$V=[V_k^1(1)V_k^2(1)\cdots V_k^m(1),V_k^1(2)\cdots\cdots V_k^m(2)\cdots\cdots]^{\mathrm T}$$

$$A=\begin{bmatrix}a_k^1(1),b_k^1(1),c_k^1(1),1,t_1-t_0,(t_1-t_0)^2,1,0,0,0\cdots\\ a_k^2(1),b_k^2(1),c_k^2(1),1,t_2-t_0,(t_1-t_0)^2,0,1,0,0\cdots\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\end{bmatrix} \tag{4.54}$$

$$X=[\delta X_k,\delta Y_k,\delta Z_k,b_0,b_1,b_2,N_k^1,N_k^2\cdots\cdots N_k^m]^{\mathrm T}$$

$$b_0=f,b_1=fa_1,b_2=fa_2$$

组成法方程为：

$$X=(A^{\mathrm T}A)^{-1}A^{\mathrm T}L$$

$$m_0=\sqrt{\frac{V^{\mathrm T}V}{mn-(6+m)}} \tag{4.55}$$

$$Q_{XX}=(A^{\mathrm T}A)^{-1}$$

以上假设在每个观测历元接收机都可以接收到 m 个卫星。其实在实际观测中，接收到的卫星数在发生变化。因此在具体列误差方程时应根据具体的接收卫星而发生变化。从理论上讲，利用观测 n 个历元的数据可以进行单点定位，但由于各种误差的影响，定位精度很低。而且从观测模型中可知，引入了许多我们并不需要知道的未知参数，过多地引入未知参数必然降低解的精度。另外未知参数的初值的确定难以达到较高的精度，需要迭代求解，计算工作量很大。由于误差的影响掩盖了整周模糊度的整数特性，确定整周模糊度变得十分复杂。而且观测过程中不可避免的周跳处理也十分复杂。总之一般情况下不用绝对定位方法，而采用相对定位法。

4.3 GPS相对定位

从以上各节的讨论不难看出，不论是测距码伪距单点定位还是载波相位绝对定位，由于受各种误差的影响其精度较低。特别是卫星星历误差、卫星钟误差在定位中加以忽略显然会对

平差结果产生较大影响。而电离层、对流层的误差尽管已作了处理，但仍然是影响绝对定位精度的主要误差源，实践证明，静态绝对定位精度可达到米级，而动态定位精度为 10m ~ 40m，不能满足测量的需要。为了消除或减弱各种误差的影响，提高定位精度，应采用相对定位法。

相对定位是用两台接收机分别安置在基线的两侧，同步观测相同的 GPS 卫星，以确定基线端点的相对位置或基线向量。同样，多台接收机安置在若干条基线的端点，通过同步观测 GPS 卫星可以确定多条基线向量。在一个端点坐标已知的情况下，可以用基线向量推求另一待定点的坐标。

相对定位有静态相对定位和动态相对定位之分。动态相对定位在第 6 章中详细叙述。这里仅讨论静态相对定位。

(1)观测值的线性组合

在两个观测站或多个观测站同步观测相同卫星的情况下，卫星的轨道误差、卫星钟差、接收机钟差以及电离层和对流层的折射误差等对观测量的影响具有一定的相关性。利用这些观测量的不同组合(求差)进行相对定位，可有效地消除或减弱相关误差的影响，从而提高相对定位的精度。

GPS 载波相位观测值可以在卫星间求差，在接收机间求差，也可以在不同历元间求差。各种求差法都是观测值的线性组合。

将观测值直接相减的过程叫做求一次差。所获得的结果被当作虚拟观测值，叫做载波相位观测值的一次差或单差。常用的求一次差是在接收机间求一次差。设测站 1 和测站 2 分别在 t_i 和 t_{i+1} 时刻对卫星 k 和卫星 j 进行了载波相位观测，如图 4.6，t_i 时刻在测站 1 和测站 2，对 k 卫星的载波相位观测值为 $\Phi_1^k(t_i)$ 和 $\Phi_2^k(t_i)$，对 $\Phi_1^k(t_i)$ 和 $\Phi_2^k(t_i)$ 求差，得到接收机间(站间)对 k 卫星的一次差分观测值为：

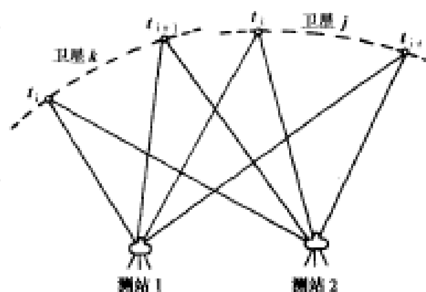


图 4.6　求差法说明图

$$SD_{12}^k(t_i) = \Phi_2^k(t_i) - \Phi_1^k(t_i) \tag{4.56}$$

同样，对 j 卫星，其时刻站间一次差分观测值为：

$$SD_{12}^j(t_i) = \Phi_2^j(t_i) - \Phi_1^j(t_i) \tag{4.57}$$

对另一时刻 t_{i+1}，同样可以列出类似的差分观测值。

对载波相位观测值的一次差分观测值继续求差，所得的结果仍可以被当作虚拟观测值，叫做载波相位观测值的二次差或双差。常用的求二次差是在接收机间求一次差后再在卫星间求二次差，叫做星站二次差分。例如对在 t_i 时刻 k、j 卫星观测值的站间单差观测值 $SD_{12}^k(t_i)$ 和 $SD_{12}^j(t_i)$ 求差，得到站星二次差分 $DD_{12}^{kj}(t_i)$ 即双差观测值：

$$\begin{aligned} DD_{12}^{kj}(t_i) &= SD_{12}^j(t_i) - SD_{12}^k(t_i) \\ &= \Phi_2^j(t_i) - \Phi_1^j(t_i) - \Phi_2^k(t_i) + \Phi_1^k(t_i) \end{aligned} \tag{4.58}$$

同样在 t_{i+1} 时刻，对 k、j 卫星的站间单差观测值求差也可求得双差观测值。

对二次差继续求差称为求三次差。所得结果叫做载波相位观测值的三次差或三差。常用的求三次差是在接收机、卫星和历元之间求三次差。例如，将 t_i 时刻接收机 1、2 对卫星 k、j 的双差观测值 $DD_{12}^{kj}(t_i)$ 与 t_{i+1} 时刻接收机 1、2 对卫星 k、j 的双差观测值 $DD_{12}^{kj}(t_{i+1})$ 再求差，即对

不同时刻的双差观测值求差，便得到三次差分观测值 $TD_{12}^{kj}(t_i,t_{i+1})$，即三差观测值：

$$TD_{12}^{kj}(t_i,t_{i+1}) = DD_{12}^{kj}(t_{i+1}) - DD_{12}^{kj}(t_i) \tag{4.59}$$

上述各种差分观测值模型能够有效地消除各种偏差项。单差观测值中可以消除与卫星有关的载波相位及其钟差项，双差观测值中可以消除与接收机有关的载波相位及其钟差项，三差观测值中可以消除与卫星和接收机有关的初始整周模糊度项 N。因而差分观测值模型是 GPS 测量应用中广泛采用的平差模型。特别是双差观测值即站星二次差分模型，更是大多数 GPS 基线向量处理软件包中必选的模型。

(2)观测方程的线性化及平差模型

为了求解观测站之间的基线向量，首先应将观测方程线性化，然后列出相应的误差方程式，应用最小二乘平差原理求解观测站之间的基线向量。为此，设观测站待定坐标近似值向量为 $X_{k0}(x_{k0}y_{k0}z_{k0})$，其改正数向量为 $\delta X_k=(\delta x_k \delta y_k \delta z_k)$，对于 $\rho_k^j(t)$项，即观测站 k 至所测卫星 j 的距离 $\rho_k^j(t)$，按台劳级数展开并取其一次微小项，有：

$$\rho_k^j(t) = \rho_{k_0}^j(t) - [l_k^j(t)\ m_k^j(t)\ n_k^j(t)]\begin{bmatrix}\delta x_k\\ \delta y_k\\ \delta z_k\end{bmatrix} \tag{4.60}$$

1)单差观测方程的误差方程式模型

对于单差观测值模型，取两观测站为 1、2，有：

$$\begin{aligned}SD_{12}^j(t) &= \varphi_2^j(t) - \varphi_1^j(t)\\ &= f/c[\rho_2^j(t) - \rho_1^j(t)] + f[\delta t_2(t) - \delta t_1(t)] + (N_2^j - N_1^j)\\ &\quad + f/c[\delta\rho_{12}(t) - \delta\rho_{11}(t)] + f/c[\delta\rho_{22}(t) - \delta\rho_{21}(t)]\end{aligned} \tag{4.61}$$

令 $\Delta t(t)=\delta t_2(t)-\delta t_1(t)$，$\Delta N^j=N_2^j-N_1^j$，$\Delta\rho_1(t)=\rho_{12}(t)-\rho_{11}(t)$，$\Delta\rho_2(t)=\rho_{22}(t)-\rho_{21}(t)$，则单差观测方程为

$$SD_{12}^j(t) = f/c[\rho_2^j(t) - \rho_1^j(t)] + f\Delta t(t) + \Delta N^j + f/c[\Delta\rho_2(t) + \Delta\rho_1(t)] \tag{4.62}$$

式中消除了卫星钟差的影响，Δt 为两观测站接收机相对钟差，最后一项为对流层和电离层的影响，如果利用模型或双频观测技术进行了修正，则为修正后的残差对相位观测值的影响，单差观测方程可简化为：

$$SD_{12}^j(t) = f/c[\rho_2^j(t) - \rho_1^j(t)] + f\Delta t(t) + \Delta N^j \tag{4.63}$$

在两观测站中，以测站 1 作为已知参考点，测站 2 为待定点，应用(4.60)和(4.63)式可得单差观测方程线性化的形式：

$$SD_{12}^j(t) = -f/c[l_2^j(t)\ m_2^j(t)\ n_2^j(t)]\begin{bmatrix}\delta x_2\\ \delta y_2\\ \delta z_2\end{bmatrix} + f\Delta t(t) + \Delta N^j + f/c[\rho_{20}^j(t) - \rho_1^j(t)] \tag{4.64}$$

式中：$\rho_1^j(t)$——由观测站 1 至卫星的 j 距离。

单差观测方程的误差方程为：

$$\Delta V^j(t) = -f/c[l_2^j(t)\ m_2^j(t)\ n_2^j(t)]\begin{bmatrix}\delta x_2\\ \delta y_2\\ \delta z_2\end{bmatrix} + f\Delta t(t) + \Delta N^j + \Delta L^j(t) \tag{4.65}$$

式中：$\Delta L^j(t)=f/c[\rho^j_{20}(t)-\rho^j_1(t)]-SD^j_{12}(t)$。

两站同步观测 n^j 个卫星的情况下，可以列出 n^j 个误差方程：

$$V(t)=[\Delta V^1(t)\quad \Delta V^2(t)\quad \cdots\quad \Delta V^{n^j}(t)]^{\mathrm{T}} \tag{4.66}$$

设同步观测同一组卫星的历元数为 n_t，则相应的误差方程式组为：

$$V=[V(t_1)\quad V(t_2)\quad \cdots\quad V(t_{nt})]^{\mathrm{T}} \tag{4.67}$$

组成法方程后便可以解算出待定点坐标改正数、钟差等未知参数。

2)双差观测方程的误差方程式模型

设两观测站同步观测的卫星为 S^j 和 S^k，以 S^j 为参考卫星，应用式(4.58)、式(4.60)可得双差观测方程(4.58)的线性化形式：

$$DD^{kj}_{12}(t)=-f/c[\Delta l^k_2(t)\quad \Delta m^k_2(t)\quad \Delta n^k_2(t)]\begin{bmatrix}\delta x_2\\ \delta y_2\\ \delta z_2\end{bmatrix}+\Delta\Delta N^k+f/c[\rho^k_{20}(t)-\rho^k_1(t)-\rho^j_{20}(t)+\rho^j_1(t)] \tag{4.68}$$

式中消去了接收机钟差等有关项：

$$DD\varphi^{kj}_{12}(t)=SD^k_{12}(t)-SD^j_{12}(t)$$

$$\begin{bmatrix}\Delta l^k_2(t)\\ \Delta m^k_2(t)\\ \Delta n^k_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}l^k_2(t)-l^j_2(t)\\ m^k_2(t)-m^j_2(t)\\ n^k_2(t)-n^j_2(t)\end{bmatrix}$$

$$\Delta\Delta N^k_2(t)=\Delta N^k-\Delta N^j$$

令 $\Delta\Delta L^k(t)=f/c[\rho^k_{20}(t)-\rho^k_1(t)-\rho^j_{20}(t)+\rho^j_1(t)]-DD\varphi^{kj}_{12}(t)$，则式(4-58)的误差方程形式为：

$$\Delta V^k(t)=-f/c[\,l^k_2(t)\Delta m^k_2(t)\Delta n^k_2(t)]\begin{bmatrix}\delta x_2\\ \delta y_2\\ \delta z_2\end{bmatrix}+\Delta\Delta N^k+\Delta\Delta L^k(t) \tag{4.69}$$

当两站同步观测的卫星数为 n^j 时，误差方程组如下：

$$V(t)=A(t)\delta X_2+B(t)\Delta\Delta N+\Delta\Delta L(t) \tag{4.70}$$

式中：$V(t)=(\Delta V^1(t)\Delta V^2(t)\quad \cdots\Delta V^{n^j-1}(t))^{\mathrm{T}}$

$$A(t)=-f/c\begin{bmatrix}\Delta l^1_2(t) & \Delta m^1_2(t) & \Delta n^1_2(t)\\ \Delta l^2_2(t) & \Delta m^2_2(t) & \Delta n^2_2(t)\\ \cdots & \cdots & \cdots\\ \Delta l^{n^j-1}_2(t) & \Delta m^{n^j-1}_2(t) & \Delta n^{n^j-1}_2(t)\end{bmatrix}$$

$$B(t)=\begin{bmatrix}1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & 1 & \cdots & 0\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ 0 & 0 & \cdots & 1\end{bmatrix}$$

$$\Delta\Delta N=(\Delta\Delta N^1\quad \Delta\Delta N^2\quad \cdots\quad \Delta\Delta N^{n^j-1})^{\mathrm{T}}$$

$$\Delta\Delta L(t)=[\Delta\Delta L^1(t)\quad \Delta\Delta L^2(t)\quad \cdots\quad \Delta\Delta L^{n^j-1}(t)]^{\mathrm{T}}$$

$$\delta X_2 = (\delta x_2 \quad \delta y_2 \quad \delta z_2)^{\mathrm{T}}$$

如果在基线两端对同一组卫星观测的历元数为 n_1，相应的误差方程式组为：

$$V = (A \quad B)\begin{bmatrix} \delta X_2 \\ \Delta\Delta N \end{bmatrix} + L \tag{4.71}$$

式中：

$$A = [A(t_1) \quad A(t_2) \quad \cdots \quad A(t_{n_1})]^{\mathrm{T}},$$
$$B = [B(t_1) \quad B(t_2) \quad \cdots \quad B(t_{n1})]^{\mathrm{T}},$$
$$L = [\Delta\Delta L(t_1) \quad \Delta\Delta L(t_2) \quad \cdots \quad \Delta\Delta L(t_{n1})]^{\mathrm{T}},$$
$$V = [V(t_1) \quad V(t_2) \quad \cdots \quad V(t_{n_1})]^{\mathrm{T}}。$$

相应的法方程式为

$$N\Delta X + U = 0 \tag{4.72}$$

式中　$\Delta X = (\delta X_2 \quad \Delta\Delta N)^{\mathrm{T}}, N = (A \quad B)^{\mathrm{T}}P(A \quad B), U = (A \quad B)^{\mathrm{T}}PL$，$P$ 为双差观测值的权阵。

与单差观测值不同的是，双差观测值之间有相关性，这里的权阵 P 不再是对角阵。如在一次观测中对 n^j 个卫星进行了相位测量，可以组成 n^j-1 个双差观测值。形成这些双差观测值时，有的单差观测值被使用多次，因而双差观测值是相关的。为使权阵形式较为简洁，可以选择一个参考卫星，其它卫星的观测值都与参考卫星的单差观测值组成双差。例如选择卫星1作为 t_i 观测历元的参考卫星，则观测历元 t_i 时，n^j-1 个双差观测值的相关系数为1/2，其协因数阵为：

$$Q_i = \begin{bmatrix} 2 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & \cdots & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & 1 & \cdots & 2 \end{bmatrix} \tag{4.73}$$

不同观测历元所取得的双差观测值彼此不相关。在一段时间内（n_1 个历元）取得的双差观测值其协因数阵为一分块对角阵：

$$Q = P^{-1} = \begin{bmatrix} Q_1 & & & \\ & Q_2 & 0 & \\ 0 & & \cdots & \\ & & & Q_{n_1} \end{bmatrix} \tag{4.74}$$

这样，双差观测模型的基线解为：

$$\Delta X = -N^{-1}U \tag{4.75}$$

对于三差模型，模型中消除了整周不定参数，通过列立误差方程、法方程，可以直接解出基线解，在此不再赘述。

4.4　周跳的探测与修复

4.4.1　周跳的产生

由载波相位测量的原理可知，理论的相位差包含两部分：整周部分和可测的不足一周的小数部分，在初始历元观测中，GPS 接收机整周计数器能记录下初始时刻至任一观测时刻的整周数及不足一周的小数部分，可见要获得高精度的定位，必须准确确定 $N'_k(1)$，ΔN，前已述及

$N'_k(1)$作为未知参数处理，而要 ΔN 准确无误，必须保证计数器连续计数。如果由于各种原因，使计数器累计发生中断，那么恢复计数器后，其所记的数与正确数之间存在一个偏差，这种偏差即称为周跳，即计数器中断所丢失的周数。

周跳产生的主要原因是卫星信号失锁，例如卫星信号被障碍物暂时遮挡，接收机本身线路瞬时故障，使基准信号无法与接收到的信号混频产生中频信号，或者产生的中频信号无法正确记数，由于外界干扰或接收机所处的状态不好，使跟踪环路无法锁定信号而引起失锁。这些原因都会使计数器计数错误，由于相位观测为瞬时观测值，因此不是一周的小数部分总能保持正确。当因为信号较长时间的失锁(数分钟)产生时，周跳一般较大，并且由于在失锁期间没有观测值很容易判别，但若周跳发生在瞬间或者说相邻两历元间，整周记数保持记数，但已发生突变，可能很大也可能很小，如何判断周跳并恢复正确的计数是 GPS 数据处理中的一项很重要的工作。许多处理软件中都已有这一功能，称为周跳的检测与修复。

4.4.2 周跳的探测与修复

(1)高次差或多项式拟合法

接收机接收卫星信号时，由于卫星不断在运动，从而使卫地距离不断发生变化，载波相位观测值 $\Delta N+\varphi$ 也随时间发生变化，在计数器不发生错误的状态下，这种变化是有规律的，当这种规律被打破时，说明观测含有周跳。

设 t_i 时刻的相位值为 $N_0+\Delta N+\varphi_i$，($i=1$，2……)，相邻历元间求单差，表示相邻历元间的相位变化，乘以波长则表示历元间径向距离的变化。如图 4.7 所示，$\rho_{i+1}-\rho_i$、$\rho_{i+2}-\rho_{i+1}$、$\rho_{i+3}-\rho_{i+2}$、$\rho_{i+4}-\rho_{i+3}$为卫星的径向速度与时间的乘积：$\frac{\Delta\rho}{\Delta t}\Delta t\approx\frac{d\rho}{dt}\Delta t$，由图可见变化较平缓。在一次差间求二次差，$\frac{\Delta\Delta\rho}{\Delta t}\Delta t=\frac{d^2\rho}{dt^2}\Delta t$ 变化更加平缓，同样求三次差、四次差……，则有：$\frac{d^4\rho}{dt^4}\to 0$、$\frac{d^5\rho}{dt^5}\to 0$。

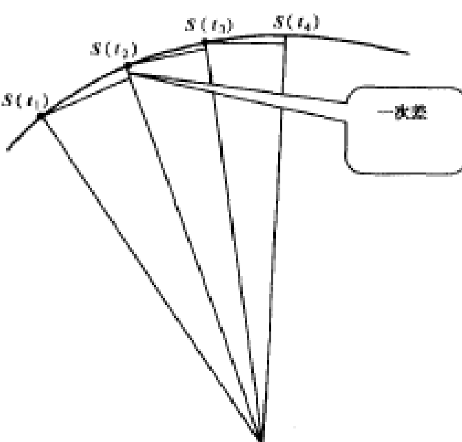


图 4.7 历元间一次求差示意图

由于接收机振荡器的随机误差，使 4 次或 5 次差也呈现随机性的数值变化，因此通过判断 4 次或 5 次差是否呈现随机性可探测是否存在粗差。考虑到接收机振荡器产生的随机误差与其稳定程度有关，若可达到 10^{-10}，对于采样间隔为 15 秒的相位观测，振荡器的随机误差给相邻的 L_1 载波相位产生 2.4 周的误差。因此使用该方法只能判断大于 3 周的周跳。表 4.1 为观测值不含周跳的情况。

观测值不含周跳的情况　　表 4.1

历 元	相 位	1 次 差	2 次 差	3 次 差	4 次 差
t1	564622.1467				
t2	575832.2249	11210.0782			
t3	587440.9684	11608.7435	398.6653		
t4	599449.5485	12008.5801	399.8366	1.1713	

续上表

历元	相位	1次差	2次差	3次差	4次差
t5	611860.4328	12410.8843	402.3042	2.4676	1.2963
t6	624675.5680	12815.1352	404.2509	1.9467	-0.5209
t7	637897.8385	13222.2705	407.1353	2.8844	0.9377
t8	651529.8804	13632.0419	409.7714	2.6361	-0.2483
t9	665574.8903	14045.0099	412.9680	3.1966	0.5605

由表4.1可看出4次差呈现随机性。为了说明含有周跳时高次差的情形，在t5时刻为加入100周的周跳。由表4.2可见，凡是与该观测值有关的差都发生了异常变化，而且随着求差次数越高，差异也就越大。4次差的异常与t5的周跳相应。周跳的大小可根据4次差的变化规律判断出来，予以修复。

观测值含周跳的情况 表4.2

历元	相位	1次差	2次差	3次差	4次差
t1	564622.1467				
t2	575832.2249	11210.0782			
t3	587440.9684	11608.7435	398.6653		
t4	599449.5485	12008.5801	399.8366	1.1713	
t5	611760.4328	12310.8843	302.3042	-97.5324	-98.7037
t6	624575.5680	12815.1352	504.2509	201.9467	299.4791
t7	637797.8385	13222.2705	407.1353	-97.1156	-299.0620
t8	651429.8804	13632.0419	409.7714	2.6361	99.7517
t9	665474.8903	14045.0099	412.9680	3.1966	0.5605

以上方法不适用于计算机处理，为此可采用多项式拟合的方法进行，多项式拟合法利用前面几个正确的相位观测值拟合一个m级多项式，用该多项式外推出下一个观测值，并与实测值进行比较，从而发现并修正周跳，由以上分析可知，经4次或5次差后，已出现随机性，因此多项式阶数取到4~5次即可。

(2)根据数据处理后的残差探测与修正周跳

这种方法适用于静态相对定位与精密后处理导航。根据数据后处理(基线解算)后的相位残差来分析定位周跳。

(3)用星际差分探测与修正周跳

由高次差探测周跳的方法可知，由于受接收机振荡器的影响，采用历元间高次求差只能探测大于3周的周跳。因此对于小周跳无能为力。对于同一台接收机接收不同的卫星信号，其接收机振荡器的影响相同，因此若采用星际差分则可以消除其影响，达到发现小周跳的目的。该方法的具体实施方法是对每颗星首先求历元间4次差，由于周跳较小，4次差后没有发现异常的变化，即被振荡器的误差所掩盖。然后进行星际求差，由于消除了振荡器的影响，因此差值应很小，一般小于0.5周。当与同一颗星的差值的4次差在某历元附近发生异常变化，则说明接收机接收的该颗卫星位于在该历元处发生周跳。发现周跳后，可利用前面的正确观测值及各次差进行外推，求出正确的整周计数。这种方法只能发现与卫星有关的周跳，对于由于接

收机有关的周跳可采用站间差分(双差分)来检测。

以上介绍的几种方法是探测与修复周跳的常用方法,也是为了获得较高精度的观测值的一种被动方法,即有错误并想方设法发现错误并改正错误,但其最根本的做法应是杜绝发生错误,即防止发生周跳。由以上分析不难看出周跳的产生与接收机的质量、观测时的条件密切相关,因此杜绝周跳应从接收机的选择、外界观测的条件以及组织观测的方法着手,以获取高质量的观测数据,即使会有周跳也是极少数,能较快地得到修复。

4.5 整周模糊度的确定

4.5.1 概述

由本章4.2节的载波相位测量定位原理可知,以载波相位观测量为根据的精密定位中,初始整周模糊度的确定是定位的一个关键问题,准确与快速地解算整周模糊度对保障定位精度、缩短定位时间、提高GPS定位效率都具有极其重要的意义。

由4.2节的讨论可知,当整周模糊度确定以后,其方程与测距码伪距测量一致。也就是说只要整周模糊度确定了,只要同步观测4颗卫星,利用一个历元也可以进行定位。因此在载波相位测量中,若能预先求解出整周未知数,则就使观测时段大大缩短。相反需要较长的时间,由于引人了较多的附加未知参数与坐标参数一同求解,而且为了克服法方程系数的病态,需要一定的时间使卫星的几何分布发生一定的变化。图4.8为定位时间与精度相关图,可见一旦整周模糊度确定,定位精度的提高并不随时间的增加而有明显提高,也就是说只要整周模糊度精确求解出来,其定位就已达到相应的精度。确定初始整周模糊度的方法较多,如:取整法、区间判断法、快速模糊度分解法、模糊度函数法、基于模糊度最小二乘平差法(LAMBAD)以及模糊度在航求解法(OTF)等,正是因为整周模糊度的重要性而使上述各种方法迅速发展起来。本节介绍GPS测量中常用的几种算法。

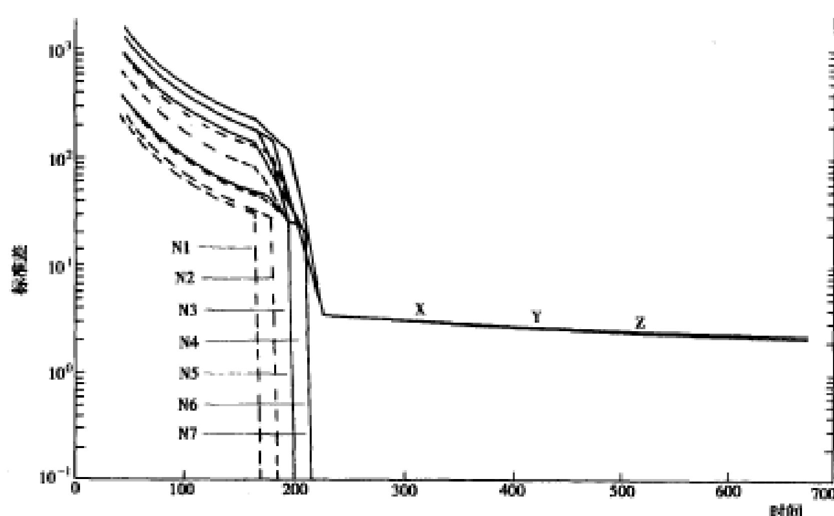


图4.8 定位时间与精度相关图

4.5.2 确定整周模糊度的静态定位法

根据 GPS 接收机所处的状态不同分为静态定位与动态定位，对于载波相位定位法，静态定位与动态定位是基于不同的模糊度求解法。在静态定位中，一般将整周未知数作为待定参数与坐标参数一同求解，根据求解的结果，确定整周模糊度。在式(4.54)中，未知参数里含接收机位置、钟差参数与整周模糊度，即使经过差分处理也包含基本相同的未知参数。将未知参数分成两部分：$X=[X_C,X_N]^T$ 则误差方程：

$$V = A_C X_C + A_N X_N - C \tag{4.76}$$

经最小二乘平差，求解出 $\hat{X}_C$，$\hat{X}_N$，根据最终 $\hat{X}_N$ 的取值，定位解分为两种情况：①整数解(固定解)：根据整周模糊度的整数特性，通过一些处理技术正确确定出某整数解，然后代入原方程，重新求解坐标未知参数，这种解称为整数解或固定解。②实数解(浮点解)：这种情况不考虑整周模糊度解的整数性，通过平差计算出来的解即为定位解，由于这时 X_N 为实数，对应解 X_C 称为实数解或浮动解，这种情况适用于长基线、外界干扰较大的情况。

下面介绍一下解算整周模糊度常用的几种方法。

(1)取整法

取整法是取最接近于模糊度参数实数解的整数为相应的模糊度整数解。如图 4.9。

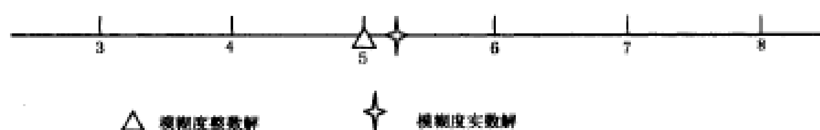


图 4.9 整数法与区间判断法

这种方法是最简单的方法，操作起来很容易。但这种情况要求 X_N 的精度要高，否则得出的结果不可靠，即标准差应小于 0.5 周，否则得不到正确解。另外若 X_N 正好处于两整数中间，该如何取值，利用这种方法就解决不了了，有效的方法是可靠性检验法，也叫区间判断法。

(2)区间判断法

利用平差结果的标准差从统计角度评定整数解的可靠性。在一定显著水平 α 下，求出模糊度实数解的置信区间，若置信区间内存在一个整数，则可以确定该整数即为模糊度整数解，如图 4.9 所示。但若在置信区间不存在整数或多个整数，该法失效。

由最小二乘解可得：$\hat{X}_C$、$\hat{X}_N$、Q_{X_N}、$\hat{\sigma}_0$。

设 N 为模糊度的整数，由概率统计可知：

$$\hat{X}_N \sim N(N,\hat{\sigma}_0^2 Q_{X_N}),\frac{\hat{X}_N - N}{\sigma_0\sqrt{Q_{X_N}}} \sim N(0,1),\frac{f\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \sim \chi^2(f) \tag{4.77}$$

因此：

$$\frac{\hat{X}_N - N}{\sigma_0\sqrt{Q_{X_N}}}\Bigg/\sqrt{\frac{f\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}/f} = \frac{\hat{X}_N - N}{\hat{\sigma}_0\sqrt{Q_{X_N}}} \sim t(f) \tag{4.78}$$

从而可求出置信区间：$\hat{X}_N - \hat{\sigma}_0\sqrt{Q_{X_N}}\cdot t_{\left(f,\frac{\alpha}{2}\right)} \le N \le \hat{X}_N + \hat{\sigma}_0\sqrt{Q_{X_N}}\cdot t_{\left(f,\frac{\alpha}{2}\right)}$，即整周模糊度参数的整数解必然位于该区间，反之若该区间存在整数，则必然为整周模糊度。也就是说位于该区间的任何一点与 $\hat{X}_N$ 无显著差别。

(3)方差比检验法

由区间判断法给出的置信区间,可以求出每个整周模糊度的取值集合,并对这些模糊度取值进行所有组合,任何一个组合都构成一个解向量,而且都与 $\hat{X}$ 无显著差别。将所有可能的组合回代到原方程,重新平差,求出新的方差值,一般方差最小的对应的那组解认为是最终解,但必须检验它与次小的有显著差别,否则该法失败。

(4)快速模糊度求解法

快速模糊度解法 FARA(Fast Ambiguity Resolution Approach)是 1990 年由 E. Frei 及 G. Beutler 提出的,从而实现了快速静态定位法,它与通常的静态定位方法相比,观测时间大大缩短,仅需几分钟,但其定位精度对于 10km 以下的短基线与静态定位精度大致相当。徕卡公司率先在 Wild200 接收机的 SKI 基线解算软件中采用了 FARA 技术。下面就对这种 FARA 技术的原理和具体实施进行介绍。

1)快速模糊度解法的基本原理

在相对定位中若测站间同步观测时间较短,则多余观测数据较少,经平差所得的解向量精度不高,模糊度参数的实数解与其相邻近的整数偏离较大,用上述几种方法很难奏效。利用上述方法构造置信区间,落在置信区间内的整数可能不止一个,若简单地取与实数解最靠近的整数来固定整数模糊度是不可靠的,达不到厘米级的定位精度。事实上落在置信区间内的每个整数都可能是其正确解,由于模糊度解向量包括了多个模糊度的实数解,我们就应对一切可能组合成的模糊度整数解向量系列进行搜索,寻求一组模糊度整数解向量作为最优解。最优解的评判标准是,用这组模糊度整数解向量回代到原方程再进行平差,所得的后验单位权中误差应最小。

与前面的方法不同,FARA 法不但利用了浮点双差解的模糊度的中误差,而且充分考虑了模糊解向量的协方差,且采用统计检验法来检验模糊度整数解是否与实数解相容,对于所得的所有可能组合的整数解向量中任两个整数之差,也利用协方差阵所提供的信息进行统计检验。若差值检验不能通过,则在包括全部容许的整数解向量的解空间中,可剔除包含这两个整数的模糊度解向量,从而大大减小需探索的整数模糊度解向量的个数,对于每一个整周模糊度解向量所对应的固定双差解,取各次平差所得的单位权中误差最少者为最优解,其相应的坐标参数估值即为最优的相对定位解算结果。

总之,最优解必须满足以下 3 个条件:

①对应的坐标解向量与浮点解的坐标解向量在统计上相容;

②对应的验后单位权中误差与浮点解的单位权中误差在统计上相容;

③对应的验后单位权中误差与其它任一个解向量所相应的单位权中误差在统计上应有显著的差异。

以上条件用统计检验的方法检验,只要有一个条件不能满足,则认为观测数据尚不足以可靠地确定整周模糊度。

2)实施步骤

①用单基线解算法得出初始解,包括浮点双差解向量以及对应的协因数阵,单位权中误差。

②用区间法求出落入置信区间的所有整数,并将之按与浮点解的近远排列,然后将所有模糊度参数的整数解进行所有可能的组合,组成新的整数解向量。为了提高搜索速度,向量中元素的组合也按一定的顺序排列,第一个向量由所有最接近于浮点解的整数组成,第二个向量

(设模糊度的个数为 r)前 $r-1$ 个与第一个向量同,最后一个取次接近于浮点解的整数,依次类推,直到第一个元素由最接近于浮点解的整数到最远的整数。由于各整数都位于置信区间内,所以对于单个模糊度来讲,都与浮点解相容,下面检验将其联合是否整体相容。

③检验向量中任两个元素之差是否与其精度信息相容。

首先检验第一个向量中前两个元素,若没有通过,则可以跳过包含这两个元素的所有向量。若通过检验,则检验第一与第三、第四……,只要有一个没有通过则可以舍去包含这两个元素的所有向量。

④将保留下来的向量作为已知值代入误差方程重新平差,得到新的坐标向量及单位权中误差。若单位权中误差最小且通过以下三个检验,则为最终解。

a.新的坐标解向量与浮点解的坐标解向量在统计上相容;

b.新的验后单位权中误差与浮点解的单位权中误差在统计上相容;

c.新的验后单位权中误差与次小单位权中误差对应的解向量在统计上有显著的差异。

4.5.3 确定整周模糊度的动态法

以上所介绍的多种确定整周模胡度的方法,虽思路各异,但都需要静态观测来实现,只是静态观测的时间的长短不同,因此均为静态法。在以往的高精度动态相对定位中,为了确定运动载体的实时位置,一般要预先确定初始整周未知数,也称初始化,且必须至少保持对四颗卫星的连续跟踪。一旦对所测卫星失锁,则必须重新确定整周未知数。这样一来严重制约了载波相位观测法在高精度动态定位中的有效应用。

动态确定整周模糊度法(Ambiguity Resolution On the Fly——OTF),是 1993 年徕卡公司开发的一种新的动态确定整周未知数的方法,其基本思想是根据 GPS 接收机在运动过程中,短时间接收到的卫星载波信号观测值,结合参考站的同步观测值,利用快速解算整周模糊度法,确定初始整周未知数。在为初始化所进行的短时间观测过程中,载体的瞬时位置,是根据随后确定的整周未知数,利用逆向求解的方法来确定的。该法的优点是在载体运动过程中,卫星一旦失锁,运动体不再需要停下来,重新进行初始化工作。这一技术的开发成功,突破了静态确定整周未知数的局限,为应用载波相位观测量进行精密实时动态相对定位(RTK)开辟了一条重要的新途径。

设流动点与参考站同步观测的卫星数为 m^j,观测的历元数为 n,对一流动点来说,未知数总数为 $3n+(m^j-1)$,双差观测方程的总数为 $(m^j-1)\cdot n$,可见为了得到确定的解,须满足条件

$$(m^j-1)\cdot n \geqslant 3n+(m^j-1) \tag{4.79}$$

于是

$$n \geqslant \frac{m^j-1}{m^j-4} \tag{4.80}$$

可见要动态确定整周未知数,所必须观测的历元数与观测的卫星数有关。从理论上讲为得到确定的解同步跟踪的卫星数至少为 5,而观测的历元数不得少于 4。

在实践中为提高解的可靠性和精确性,适当增加观测的历元数,徕卡公司 1994 年推出的软件中,要求这一观测时段的长度约为 200s。目前,这一方法在短距离(< 20km)实时动态相对定位中其定位精度可达厘米级。

站与用户站之间距离的增加，会出现系统误差，这是用任何差分方法都不能消除的。因此，位置差分只适用于基准站与用户站相距 100km 以内的情况。

5.2 伪距差分原理

伪距差分是目前用途最广的一种差分技术。几乎所有的商用差分 GPS 接收机均采用这种技术，国际海事无线电委员会推荐的 RTCM SC—104 也采用了这种技术。

5.2.1 伪距差分

在基准站上观测所有卫星，根据基准站的已知精密坐标(X_0, Y_0, Z_0)和由星历数据计算得到的某一时刻各卫星的地心坐标(X^j, Y^j, Z^j)，按下式求出每颗卫星在该时刻到基准站的真正距离 R^j：

$$R^j = [(X^j - X_0)^2 + (Y^j - Y_0)^2 + (Z^j - Z_0)^2]^{1/2} \tag{5.4}$$

设此时测得的伪距为 ρ_0^j，则伪距改正数为：

$$\Delta\rho^j = R^j - \rho_0^j \tag{5.5}$$

其变化率为：

$$\Delta\dot{\rho}^j = \Delta\rho^j / \Delta t \tag{5.6}$$

基准站将 $\Delta\rho^j$ 和 $\Delta\dot{\rho}^j$ 发送给用户站，用户站在测出的伪距 ρ^j 上加以改正，即可求出经改正后的伪距：

$$\rho_u^j(t) = \rho^j(t) + \Delta\rho^j(t) + \Delta\dot{\rho}^j(t - t_0) \tag{5.7}$$

只要观测 4 颗卫星，利用改正后的伪距 $\rho_u^j (j = 1,2,3,4)$ 就可按以下伪距观测方程计算用户站的坐标：

$$\rho_u^j = [(X^j - X_u)^2 + (Y^j - Y_u)^2 + (Z^j - Z_u)^2]^{1/2} + c \cdot \delta t + v \tag{5.8}$$

式中：δt——钟差；

v——接收机噪声。

伪距差分有以下优点：

1)由于计算的伪距改正数是直接在 WGS—84 坐标上进行的，即得到的是直接改正数，不变换为当地坐标，所以能达到很高的精度。

2)这种改正数能提供 $\Delta\rho^j$ 和 $\Delta\dot{\rho}^j$，所以在未得到改正数的空隙内能继续精密定位。这达到了 RTCM—104 所制定的标准。

3)基准站能提供所有卫星的改正数，而用户站只需接收 4 颗卫星即可进行改正，无需与基准站接收相同的卫星数。因此，用户站采用具有差分功能的简易接收机即可。

与位置差分相似，伪距差分能将两站间的公共误差抵消，但随着基准站与用户站之间距离的增加，系统误差将会明显增加，且这种误差采用任何差分方法都不能予以消除。因此，基准站与用户站之间的距离对伪距差分的精度有决定性影响。

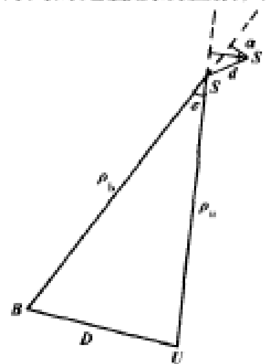


图 5.1 基准站与用户站之距离对差分精度的影响

如图 5.1 所示，B、U 分别表示基准站和用户站，两者之间距离为 D。基准站和用户站至卫星的伪距分别为 ρ_b、ρ_u。假设测量无误

差，由于卫星钟与 GPS 时间并非精确同步，故 GPS 信号中所含的卫星位置也无法与卫星的实际位置相一致。设卫星实际位置与 GPS 信号传播的位置之间的斜距为 d，基准站和用户站的伪距测量值的误差分别为 $\delta\rho_b$ 和 $\delta\rho_u$，显然 $\delta\rho_b \neq \delta\rho_u$。伪距差分即用 $\delta\rho_b$ 改正用户站的伪距观测值，故始终有无法校正的剩余误差：

$$|e_{bu}| = |\delta\rho_b - \delta\rho_u| \tag{5.9}$$

其中

$$\left.\begin{aligned}\delta\rho_b &= d\cdot\sin\alpha\\ \delta\rho_u &= d\cdot\sin(\alpha-\varepsilon)\end{aligned}\right\} \tag{5.10}$$

因为 ε 很小，所以 $\cos\varepsilon\approx1$，$\sin\varepsilon\approx\varepsilon$，故：

$$\begin{aligned}|e_{bu}| &= d\cdot|\sin\alpha-\sin(\alpha-\varepsilon)|\\ &= d\cdot|\sin\alpha-(\sin\alpha\cos\varepsilon-\cos\alpha\sin\varepsilon)|\\ &\approx d\cdot\varepsilon\cdot\cos\alpha\end{aligned} \tag{5.11}$$

顾及 $\varepsilon\approx\sin\varepsilon\approx D/R$（$R$ 为基准站到卫星的真距），有：

$$|e_{bu}| = \frac{D\cdot d}{R}\cos\alpha \tag{5.12}$$

由此可以得出以下结论：

①用户站至基准站的距离越大，用 GPS 差分得到的位置精度越低。

②若把 $\sigma = d\cdot\cos\alpha$ 理解为卫星的误差，则卫星的位置误差与 GPS 差分的误差成正比关系。

例如，若卫星位置误差 $\sigma = 100\text{m}$，用户站至基准站距离 $D = 100\text{km}$，$R = 20000\text{km}$，

则 $$|e_{du}| = \frac{100\text{m}\cdot100\text{km}}{20000\text{km}} = 0.5\text{m}。$$

5.2.2 扩展伪距差分（广域差分）

扩展伪距差分又称广域差分。为了在一个广阔的地区内提供高精度的差分 GPS 服务，将若干个基准站和主站组成差分 GPS 网。主差分站接收来自各个监测站的差分 GPS 信号，然后将其组合并形成在扩展区域内的有效差分 GPS 改正电文，通过卫星通信线路或无线电数据链把扩展 GPS 改正信号传送给用户站，这就形成了扩展的差分 GPS。

扩展差分 GPS 的基本思想是对 GPS 观测量的误差源加以区分，并单独对每一种误差分别加以“模型化”，然后将计算出的每一误差源的数值，通过数据链传输给用户站，改正用户站的 GPS 定位误差。具体而言，其误差集中表现在以下三个方面：

1)星历误差

广播星历是一种外推星历，精度不高，约在 ±20m 左右，它是 GPS 定位的主要误差来源之一。扩展差分 GPS 依赖区域精密定轨，确定精密星历，取代广播星历。

2)大气时延误差（包括电离层时延和对流层时延）

常规差分 GPS 提供的综合改正值误差较大，这是因为用户站与基准站两地面大气层的电子密度和水气密度不同，对 GPS 信号的时延也就不一样。广域差分 GPS 技术通过建立精确的区域大气时延模型，能精确地计算出其作用区域内的大气时延量。

3)卫星钟差误差

对星历误差和大气时延误差进行精确改正后，残余误差中卫星钟差影响最大。常规差分

GPS利用广播星历提供的卫星钟差改正数仅近似反映了卫星钟与标准GPS时间的物理差异，实际上，受SA的δ抖动影响，卫星钟差达±300ns，等效伪距为±90m。而广域差分GPS可以计算出卫星钟各时刻的精确钟表值。

与伪距差分相比，广域差分不仅扩大了差分GPS的有效工作范围，而且保证了该区域的定位精度，表5.1中的数据也进一步说明了这一点。

差分GPS误差预算 表5.1

分 类	伪距差分GPS					扩展差分GPS
距离(km)	0	30	150	300	600	600
卫星时钟误差(m)	0	0	0	0	0	0
卫星星历误差(m)	0	0.1	0.5	1	2	1
电离层效应(m)	0	2.7	5.3	7.0	9.0	2
对流层效应(m)	0	2	2	2	2	0.7
接收机噪声(m)	1	1	1	1	1	1
UERE(RMS)	1	3.5	5.8	7.4	9.5	2.7
导航精度 adRMS (HPOP=1.5)	3	10.5	17.4	22.2	27.5	8

5.3 相位平滑伪距差分原理

GPS接收机除了能进行伪距测量外，稍加改进，可同时进行载波相位测量。由于载波相位测量的精度比码相位测量的精度高2个数量级，所以，若能获得载波整周数，就可获得近乎无噪声的伪距测量。一般情况下，载波整周数无法获取，但能获得载波频率多普勒计数。实际上，载频多普勒计数反映了载波相位变化信息，即反映了伪距变化率。在GPS接收机中一般利用这一信息作为用户的速度估计。顾及载频多普勒测量能精确地反映伪距变化，若能利用这一信息辅助码伪距测量，则可以获得比单独采用码伪距测量更高的精度，这一思路称为相位平滑伪距测量。

根据第4章的有关内容并简化表示符号，伪距和相位的观测方程可表示为：

$$\rho^j = R_u^j + c \cdot \delta t + v_1 \tag{5.13}$$

$$\lambda(\varphi^j + N^j) = R_u^j + c \cdot \delta t + v_2 \tag{5.14}$$

式中：ρ^j——经差分改正后的用户站到卫星的伪距；

δt——钟差；

φ^j——观测的相位小数；

N^j——整周相位模糊度；

λ——波长；

R_u^j——用户站至卫星的真实距离；

v_1、v_2——接收机的测量噪声。

式(5.14)中包含着整周相位模糊度N，由于N的求解比较困难，无法直接将其值用于动态测量，所以采用历元间的相位变化来平滑伪距。

t_1、t_2两时刻的相位观测量之差为：

$$\delta\rho^j(t_1,t_2) = \lambda[\varphi^j(t_2) - \varphi^j(t_1)]$$
$$= R_u^j(t_2) - R_u^j(t_1) + c\cdot\delta t_2 - c\cdot\delta t_1 + v'_2 \qquad (5.15)$$

式中，整周相位模糊度消除了，v_2'为两时刻的接收机测量噪声之差。若基准站与用户站相距不太远，GPS相位测量的噪声电平为毫米量级，所以相对伪距观测而言，可忽略其影响，即取$v'_2=0$。

t_2时刻的伪距观测量为：

$$\rho^j(t_2) = R_u^j(t_2) + c\cdot\delta t_2 + v_1 \qquad (5.16)$$

将式(5.15)中的$R_u^j(t_2)+c\cdot\delta t_2$代入式(5.16)得：

$$\rho^j(t_2) = R_u^j(t_1) + c\cdot\delta t_1 + \delta\rho^j(t_1,t_2) + v_1 \qquad (5.17)$$

顾及差分伪距观测量的噪声呈高斯白噪声，均值为零，则由式(5.3)和式(5.17)得：

$$\rho^j(t_1) = R_u^j(t_2) - \delta\rho^j(t_1,t_2) \qquad (5.18)$$

由上式可以看出，t_1时刻的伪距值可以由不同时刻的相位差回推求出。假设有k个历元的观测值$\rho^j(t_1),\rho^j(t_2),\cdots,\rho^j(t_k)$，利用相位观测量可求出从$t_1$到$t_k$的相位差测量值$\delta\rho^j(t_1,t_2),\delta\rho^j(t_1,t_3),\cdots,\delta\rho^j(t_1,t_k)$，于是可求出$t_1$时刻$k$个伪距观测量：

$$\begin{cases}\rho^j(t_1) = \rho^j(t_1)\\ \rho^j(t_1) = \rho^j(t_2) - \delta\rho^j(t_1,t_2)\\ \cdots\cdots\\ \rho^j(t_1) = \rho^j(t_k) - \delta\rho^j(t_1,t_k)\end{cases} \qquad (5.19)$$

将上述k个值取平均，得到t_1时刻的伪距平滑值：

$$\overline{\rho^j(t_1)} = \frac{1}{k}\Sigma\rho^j(t_1) \qquad (5.20)$$

显然，该相位平滑伪距大大减小了噪声。设每时刻接收机测量噪声的方差为$\sigma^2(\rho)$，则相位平滑伪距差分的误差方差为：

$$\sigma^2(\bar{\rho}) = \frac{1}{k}\sigma^2(\rho) \qquad (5.21)$$

利用式(5.19)和式(5.20)，可推得其它各时刻的伪距平均值：

$$\overline{\rho^j(t_i)} = \overline{\rho^j(t_1)} + \delta\rho^j(t_1,t_i) \qquad i=(2,3,\cdots,k) \qquad (5.22)$$

以上推导适用于数据的后处理。当实时应用时，可采用另一种类似于滤波的平滑方式。

设$\overline{\rho^j(t_1)}=\rho^j(t_1)$，则有

$$\rho^j(t_i) = \frac{1}{i}\rho^j(t_i) + \frac{i-1}{i}[\overline{\rho^j(t_{i-1})} + \delta\rho^j(t_{i-1},t_i)] \qquad (5.23)$$

上式可理解为相位平滑的差分伪距值是直接差分伪距观测值与推算值的加权平均。

进一步地，若要求得用户站的坐标，可利用相位平滑伪距的观测量按式(5.8)建立模型求解。因为对各颗卫星的伪距观测是等精度的，所以伪距观测方程的权阵仅与平滑次数有关，即权阵为：

$$\begin{bmatrix}k_1 & 0\\ k_2 & \\ 0 & k_n\end{bmatrix} \qquad (5.24)$$

式中：n——观测卫星的个数。

5.4 载波相位差分原理

5.4.1 概述

测地型 GPS 接收机利用卫星载波相位进行的静态基线测量，可达到 $10^{-6} \sim 10^{-8}$的高精度。但是，为了可靠地求解出整周相位模糊度，必须连续观测一两个小时或更长时间，这限制了其实际应用。于是，解决这一问题的各种方法应运而生。例如，采用整周模糊度快速逼近技术（FARA）使基线观测时间缩短至 5min；采用准动态（stop and go）、往返重复设站（Re－occupation）和动态（Kinematic）方法可以提高 GPS 作业效率。然而，这些作业方式都是事后进行数据处理，不能实时提交成果和实时评定成果质量，不仅难以避免出现事后检查不合格造成的返工现象，而且限制了 GPS 定位技术在某些领域的应用。

差分 GPS 技术的出现，克服了上述困难，能实时以米级的精度给定载体位置，满足了城市交通、导航和水下地形测量等要求。目前，位置差分、伪距差分、相位平滑伪距差分等技术已成功地应用于各种作业中，更加精密的载波相位差分技术亦已获得越来越广泛的应用。

载波相位差分技术又称 RTK 技术（Real Time Kinematic），通过对两测站的载波相位观测值进行实时处理，能实时提供测站的三维坐标，并达到厘米级的高精度。其原理与伪距差分基本相同，即由基准站通过数据链实时将其载波相位观测值及基准站坐标信息一起传送给用户站，用户站将接收的 GPS 卫星的载波相位与来自基准站的载波相位组成相位差分观测值，通过实时处理确定用户站的坐标。

根据基准站传送载波相位信息的不同，载波相位差分又分为修正法和差分法两种。前者与伪距差分相同，基准站将载波相位修正量送给用户站，以改正其载波相位，然后求解其坐标；后者则是将基准站接收的载波相位发送给用户站，并与用户站接收的 GPS 卫星载波相位求差，然后求解其坐标。所以，前者为准 RTK 技术，后者为真正的 RTK 技术。

5.4.2 载波相位差分原理

设在基准站观测第 j 颗 GPS 卫星，求得其伪距为：

$$\rho_b^j = R_b^j + C(\delta t_b - \delta t_s^j) + \delta\rho_b^j + (\delta\rho_b^j)_{ion} + (\delta\rho_b^j)_{trop} + \delta M_b + v_b \tag{5.25}$$

式中：R_b^j——基准站到第 j 颗卫星的真实距离，可由基准站坐标和卫星的星历求得；

δt_b——基准站的钟差；

δt_s^j——第 j 颗卫星的钟差；

$\delta\rho_s^j$——第 j 颗卫星的星历误差引起的伪距误差；

$(\delta\rho_b^j)_{ion}$——电离层延迟误差；

$(\delta\rho_b^j)_{trop}$——对流层延迟误差；

δM_b——多路径效应误差；

v_b——接收机的测量噪声。

将式（5.25）整理得基准站到第 j 颗卫星的伪距改正数：

$$\begin{aligned}\Delta\rho_b^j &= R_b^j - \rho_b^j \\ &= -C(\delta t_b - \delta t_b^j) - \delta\rho_s^j - (\delta\rho_b^j)_{ion} - (\delta\rho_b^j)_{trop} - \delta M_b - v_b\end{aligned} \tag{5.26}$$

类似地，用户站到第 j 颗卫星的伪距为：

$$\rho_u^j = R_u^j + C(\delta t_u - \delta t_s^j) + \delta\rho_u^j + (\delta\rho_u^j)_{ion} + (\delta\rho_u^j)_{trop} + \delta M_u + v_u \tag{5.27}$$

用基准站的伪距改正数 $\Delta\rho_b^j$ 对用户站的伪距 ρ_u^j 修正，有：

$$\begin{aligned}\Delta\rho_b^j + \rho_u^j = {} & R_u^j + C(\delta t_u - \delta t_b) + (\delta\rho_u^j - \delta\rho_b^j) + [(\delta\rho_u^j)_{ion} - (\delta\rho_b^j)_{ion}] \\ & + [(\delta\rho_u^j)_{trop} - (\delta\rho_b^j)_{trop}] + (\delta M_u - \delta M_b) + (v_u - v_b)\end{aligned} \tag{5.28}$$

当基准站与用户站相距较近（小于 100km）时，取 $\delta\rho_u^j = \delta\rho_b^j$，$(\delta\rho_u^j)_{ion} = (\delta\rho_b^j)_{ion}$，$(\delta\rho_u^j)_{trop} = (\delta\rho_b^j)_{trop}$，则有：

$$\begin{aligned}\Delta\rho_b^j + \rho_u^j &= R_u^j + C(\delta t_u - \delta t_b) + (\delta M_u - \delta M_b) + (v_u - v_b) \\ &= [(X^j - X_u)^2 + (Y^j - Y_u)^2 + (Z^j - Z_u)^2]^{1/2} + \overline{\Delta\rho}\end{aligned} \tag{5.29}$$

式中：$\overline{\Delta\rho}$——同一观测历元的各项残差之和，即：

$$\overline{\Delta\rho} = c(\delta t_u - \delta t_b) + (\delta M_u - \delta M_b) + (v_u - v_b) \tag{5.30}$$

式(5.29)含有用户站的坐标(X_u，Y_u，Z_u)和$\overline{\Delta\rho}$共 4 个未知数，所以只要基准站和用户站同时观测 4 颗卫星，就可进行求解。

在载波相位差分中，基准站和用户站至卫星的伪距用载波相位观测量表示为：

$$\rho_b^j = \lambda(N_{bo}^j + N_b^j) + \varphi_b^j \tag{5.31}$$

$$\rho_u^j = \lambda(N_{uo}^j + N_u^j) + \varphi_u^j \tag{5.32}$$

式中：N_{bo}^j、N_{uo}^j——初始相位模糊度，即相位整周数的初始值；

N_b^j、N_u^j——从初始历元开始至观测历元间的相位整周累积数；

φ_b^j、φ_u^j——测量相位的小数部分；

λ——载波波长，L_1 载波的波长为 19cm。

基准站的载波相位数据由数据链传送至用户站，在用户站上将两者进行差分，顾及式(5.26)、式(5.29)、式(5.31)和式(5.32)得：

$$\begin{aligned}& R_b^j + \lambda(N_{uo}^j - N_{bo}^j) + \lambda(N_u^j - N_b^j) + \varphi_u^j - \varphi_b^j \\ & = [(X^j - X_u)^2 + (Y^j - Y_u)^2 + (Z^j - Z_u)^2]^{1/2} + \overline{\Delta\rho}\end{aligned} \tag{5.33}$$

上式中，初始相位模糊度未知，所以如何求解初始相位模糊度是求解用户站坐标最关键的问题。在静态 GPS 测量中，求解初始相位模糊度的方法有下列 4 种：

1)删除法

该方法由 Hatch 提出，它建立在删除不适用的整周数集合之上。它要求观测 5 颗以上卫星，并用其中 4 颗求解，确定其搜索范围。在搜索范围内将求得的解与其余每颗卫星观测值求差，取差值的平方和作为判断因子，若超过了某一整周未知数解集所容许的上限，即予以删除。此后也不再进一步检核该组整数解。当余下唯一一组解集时，取该组为求解结果。

2)模糊度函数法

该方法由 Counselman 提出理论，经 Remondi 在 GPS 数据处理中应用而形成。该方法对周跳不敏感，且间接地求解整周未知数。其基本思想是在初始值精度较高的前提下，通过对几分钟观测数据采取函级加密的搜索策略，直接确定点位的精确解。然后，根据点位的精确解反算整周未知数。

3)FARA 法

该方法由 Frei 等人提出，又称为整周未知数快速逼近技术。它以统计理论为基础，在某一

估值的解空间内搜索一组方差和为最小的似然整周数解集，并检验其优于其它解集的显著性。

4)消去法

该方法由 Remondi 提出。其原理是通过对原始观测量求单差、双差和三差，消去相位模糊度和其它钟差，求解出点位的概略坐标。然后，利用浮动双差求解出相位模糊度。最后，将相位模糊度固定为整数，利用最小方差原则确定初始相位模糊度。

下面简要介绍 FARA 求解初始相位整周模糊度及用户站坐标的过程。令：

$$\Delta\varphi^j = \lambda(N_u^j - N_b^j) + \varphi_u^j - \varphi_b^j \tag{5.34}$$

$$N^j = N_{t_0}^j - N_{t_0}^j \tag{5.35}$$

式中 $\Delta\varphi^j$、N^j 分别表示基准站与用户站载波相位测量值之差和初始相位整周数之差。若在整个测量时段中保持卫星跟踪不失锁，则 N^j 为常数。式(5.33)可写为：

$$R_b^j + \lambda N^j + \Delta\varphi^j = [(X^j - X_u)^2 + (Y^j - Y_u)^2 + (Z^j - Z_u)^2]^{1/2} + \overline{\Delta\rho} \tag{5.36}$$

式中 N^j、X_u、Y_u、Z_u 和 $\overline{\Delta\rho}$ 为未知数，N^j 为整数形式。在卫星信号不失锁的情况下，除 N^j 保持不变外，其它 4 个参数均会随观测历元的变化而变化。

现对 $\overline{\Delta\rho}$ 随观测历元变化而发生变化的程度作一分析。在式(5.30)中，第一项 $C(\delta t_u - \delta t_b)$ 为基准站和用户站时钟偏差导致的距离误差。在数据处理时，程序要求采用 GPS 时，须把两站采集数据的时间归化到整秒上进行。所以，尽管 GPS 接收机采用的晶体振荡器稳定度仅为 10^{-7}，但仍能保证达到 10-9 的精度。因此这一项在第 i 个历元和第 $i+1$ 个历元间基本不变。第二项 $(\delta M_u - \delta M_b)$ 为两站多路径效应不一致所带来的误差。对于基准站而言，天线保持不变，所以 δM_b 不变。用户站是处于运动中的，但就相邻观测历元而言，δM_u 基本不变。因此，对于两相邻观测历元，$(\delta M_u - \delta M_b)$ 基本不变。第三项 $(v_u - v_b)$ 为两站 GPS 接收机的测量噪声之差。一般地，同型号接收机的测量噪声基本相同。由此可知，在每个历元之间的 $\overline{\Delta\rho}$ 基本保持不变，在求解过程中可以视为常数。

由上述分析可知，在式(5.36)中，N^j、$\overline{\Delta\rho}$ 为常数，X_u、Y_u、Z_u 为随观测历元变化而变化的量。设在基准站和用户站同时观测 4 颗相同的卫星，在第 1 个历元可以得到式(5.36)的 4 个单差方程，其中包括 8 个未知数：$X_u^{(1)}$、$Y_u^{(1)}$、$Z_u^{(1)}$、$\overline{\Delta\rho}$、$N^j(j=1,2,3,4)$，在第 2 个历元又得到式(5.36)的 4 个单差方程，此时的未知数增加了 3 个：$X_u^{(2)}$、$Y_u^{(2)}$、$Z_u^{(2)}$。由此继续观测，当观测 5 个历元时，可得到式(5.36)的 20 个单差方程，未知数个数也为 20，它们是 $X_u^{(i)}$、$Y_u^{(i)}$、$Z_u^{(i)}(i=1,2,3,4,5)$、$\overline{\Delta\rho}$、$N^j(j=1,2,3,4)$。这样就可以对方程求解。经过若干历元后，可通过平差精确求出 $\overline{\Delta\rho}$ 和 $N^j(j=1,2,3,4)$，将该值代入同一历元的 4 个单差方程，即可求得该历元用户站的精确坐标，精度可达到厘米级。在动态定位过程中，若由于某种原因引起卫星信号失锁，也可以采用该方法重新估算 N^j 而继续精确定位。

载波相位差分技术——RTK 技术以其测量精度高、时间短等优势在 GPS 定位领域独树一帜，在快速静态测量、准动态测量和动态测量中获得了广泛的应用，它不仅能快速建立高精度的工程控制网，而且能进行实时动态放样和一步法成图。例如，高速公路控制网的建立、大型或水上建筑物的施工放样，地籍和房产图的测绘等。实践证明，RTK 技术大大地提高了其自动化程度和工作效率，降低了劳动成本，创造了良好的经济效益和社会效益。

然而，这一技术仍存在着一定的局限性。例如，基准站信号的传输延迟，给实时定位带来误差；高比特率数据传输的可靠性和电台干扰更是制约了其实时定位的精度和工作效率。但是，正是由于这一技术的先进性，GPS 生产厂商已对其缺陷引起了高度重视，各种系统已不断

间世,成为解决这一问题的重要发展方向。

5.5 数 据 链

5.5.1 概述

在差分 GPS 定位中,基准站与用户站之间数据的传输是通过数据链实现的。数据链由调制解调器和电台组成。

调制解调器(Modem)具有调制和解调两种功能。在基准站,调制解调器将定位数据(如改正数)进行编码和调制,然后通过电台发射出去;在用户站,调制解调器对接收到的数据进行解调,然后送入 GPS 接收机进行数据处理。

电台将调制后的数据变成强大的电磁波辐射出去,能在作用范围内提供足够的信号强度,使用户站能可靠地接收。发射频率和辐射功率的选择是数据链的重要技术指标,它视作用距离而定。

根据已建立的各种无线电导航定位系统的发射频率和作用距离,我们可以将通信设备分为直接波传输和地波传输两大类。直接波传输采用的是甚高频(VHF)和超高频(UHF)。基准站的天线必须建立在高塔之上,通过视距直接通视的方式以 25w 的功率进行传输,一般作用距离为 20～100km。这种设备的天线简单,容易架设,便于流动作业,适用于海港、河道等测量应用。

地波传输采用的是低频(LF)和中频(MF)。这种信号能沿地球表面传播,能绕过建筑物和山丘,使作用距离达到 1000～2000km。为了提高辐射效率,天线设计为高桅杆或铁塔,适合于固定基准站。这种固定基准站一旦建立,就能长期为远距离导航和定位服务。

5.5.2 RS—232—C 接口

数据终端设备(DTE)与数据通信设备(DCE)之间通过数据通信接口相连接。GPS 接收机与调制解调器之间的通信,一般采用 RS—232—C 接口。

RS—232—C 是美国电子工业协会(EIA)于 1969 年公布的,字母 RS 表示 Recommended Standard(推荐标准),232 是识别代号,C 为标准版本号。

RS—232—C 采用负逻辑。负电压表示逻辑“1”,驱动器的输出电压必须在 -5v～-15v 之间,数据线处于传号状态,控制线处于“OFF”状态。正电压表示逻辑“0”,驱动器的输出电压必须在 +5v～+15v 之间,数据线处于空号状态,控制线处于“ON”状态。该标准规定的逻辑电平的过渡区为 -3～+3v,由此可知噪声容限为 2v。所谓噪声容限,是指发送端输出必须达到的逻辑电平绝对值的下限与接收端识别输入逻辑值所需要的绝对值的下限之差,它表明从发端到收端所允许的信号损失。对于 RS—232—C 而言,5v-3v=2v。信号电平之所以选用 ±3～±15v,是考虑到提高抗干扰能力和提高传送距离的需要。大多数计算机驱动电路都工作在这段电压范围内,能提供很好的抗干扰性,并使传输速率高达 20000bit/s。在联机时,驱动电压限定在上述数值内。在脱机时不得超过 ±25v。

一般地,电缆的最大物理长度不超过 15m,线端电容不超过 2500pF。RS—232—C 的驱动电路必须能承受电缆中任何导线的短路,而不会导致有关设备的损坏。

RS—232—C 一般采用 DB—25(D 型 25 芯接插头)或 DB—9(D 型 9 芯接插头)作为接口连接器。一般插头(针)用于连接 DTE(终端设备),插座(孔)用于 DCE(调制解调器)。表 5.2 列

出了RS—232—C的接口定义。

RS—232—C的接口定义　　表5.2

9芯针号	25芯针号	信　号	信号流向	EIA名称	定　义
1	8	DCD	DTE	CF	载波检测输出
2	3	RD	DTE	BB	数据输入
3	2	TD	DCE	BA	数据输出
4	20	DTR	DCE	CD	数据终端准备好
5	7	GND		AB	地
6	6	DSR	DTE	CC	Modem数据准备好
7	4	RTS	DCE	CA	请求发送/PTT控制输入
8	5	CTS	DTE	CB	消除发送输出
9	22	RI	DTE	CE	环路指示器

上述信号的功能如下：

5脚：信号地，这是信号电压的参考点。不管电缆如何连接，这条线是必不可少的。

2脚：接收数据（RD），由调制解调器送至终端设备的信号。

3脚：发送数据（TD），由调制解调器送至电台的信号。该信号发送的条件为：请求发送（RTS）为正电压（7脚）；消除发送（CTS）为正电压（8脚）；数据终端准备好（DTR）为正电压（4脚）；调制解调器准备好（DSR）为正电压（6脚）。

在具体连接时，必须根据终端设备和调制解调器的说明选择连接方式。值得强调的是，3脚为发送数据，是指终端发送、调制解调器接收；2脚为接收数据，是指调制解调器发送、终端接收。两者切勿混淆。

5.5.3 调制解调器

调制就是利用调制信号（差分改正信号）改变载波的某一参数的过程。常用的载波为正弦波，振幅、频率和相位为表征正弦波的参数。调制是对这三个参数之一进行调制，包括调幅、调频和调相。解调是调制的逆过程，即从已调制载波中解调出所需要的带有信息的基带信号——差分改正数。

调制解调器可根据调制方式和调制速率分类。按调制方式可分为：

1）数字调幅，其中有单边带（SSB）调幅、正交双边带调幅（QAM）、残余边带调幅（VSB）、线性调制的相干解调等；

2）数字调频，其中有二进制频移键控（FSK）、最小频移键控（MSK）、正弦频移键控（SFSK）、平滑调频（TFM）、高斯滤波的MSK（GMSK）等；

3）数字调相，其中有二相相移键控（ZPSK）、四相相移键控（QPSK）、交错正交相移键控（O-QPSK）等。

按照调制速率可分为：300bit/s，600bit/s，1200bit/s，2400bit/s，4800bit/s和9600bit/s等6种。数据传输速率不同，所采用的调制方式也不同。300bit/s，600bit/s，1200bit/s等低速率的调制器一般采用FSK方式，其调制频率多选为表5.3的数据。

低速率的调制频率　　表 5.3

比特率 bit/s	调制频率"1"Hz	调制频率"0"Hz	系　数
300	980	1180	1.2
600	1650	1850	1.1
1200	1300	2100	1.6

对于 2400bit/s 等中速率的调制器，均采用 MSK 和 GMSK 方式。对于高速率的调制器，则采用 ZPSK 和 QPSK 方式。

差分 GPS 数据链中最常用的调制方式为 FSK、MSK 和 GMSK 方式。

5.5.4　纠错编码

纠错编码是提高数字传输可靠性的一项技术，是正确传输差分 GPS 改正信号的重要手段。在数据传输过程中，由于传输信道内部噪声及其造成的符号间干扰，以及传输外界环境的干扰，必然会产生差错，使得接收机接收错误的信息，从而导致下列情况的发生：可能因错误数据而不被 GPS 接收机所接受；或者可能 GPS 接收机接收后产生错误的结果。因此，必须进行差错控制，而差错控制的关键是纠错编码。

差错控制方式的基本思想分两类：一类是接收端发现传送的数据有错时，收端译码器自动纠错；另一类是收端发现错误后，通过反馈信道传送一个应答信号，要求发端重新发送此信号，达到纠错的目的。差错控制基本类型如图 5.2 所示。

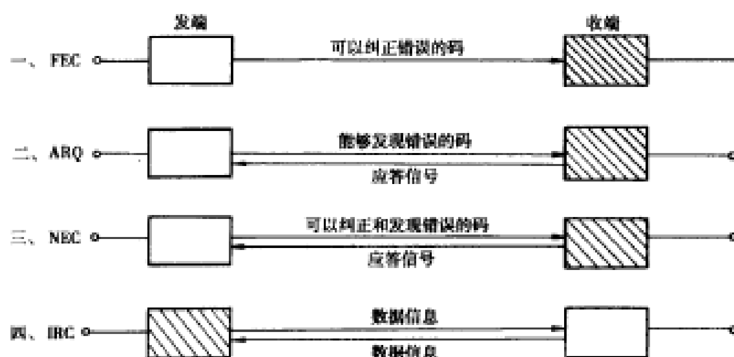


图 5.2　差错控制的基本类型（斜线方框表示纠错单元）

1）前向纠错（FEC）

该方式是发端将数据信息按一定规则附加多余码元，组成具有纠错能力的码。接收端收到后，按预先的规则进行译码，以确定接收码组中有无错误。若有错，则确定其位置并进行纠正。其方框图如图 5.3 所示。

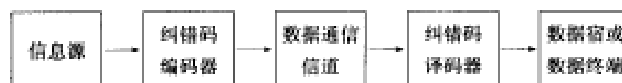


图 5.3　FEC 方框图

FEC 方式的主要优点是：不需要反馈信道，能用于单向通信，因而适用于差分 GPS 系统中的一个基准站和多个用户站的情况。但这种方式的译码设备比较复杂。为了纠正比较多的错误，要求附加很多的多余码元，通常为总码元的 25%～50%，因而传输效率较低。随着编码理论以及大规模集成电路的发展，译码器做得越来越简单，成本越来越低，这种方式正得到日益

广泛的应用。

2)检错重传(ARQ)

检错重传又称为判决反馈或反馈纠错。发送端对数据信息进行分组编码,加入一定的多余码元,使其具有一定的检错能力。接收端接收到码组后,按一定的规则对其进行有无错误判别,并将判别结果(应答信号)通过反馈信道回送给发送端。发送端根据应答信号把接收端认为有错的那组数据重新传输。若重发的码组经接收端检验仍然有错,继续重发数据和检验判别,重复此过程,直至该数据码组经接收端检验无错为止。

ARQ方式的主要优点是:只需要少量的多余码元(一般为总码元的5%~20%),即可获得极低的输出误码率,并对不同信道具有一定的自适应能力。此外,ARQ的检错译码器结构简单、成本低廉。这种检错方式用于专用差分GPS定位系统,只能允许一对差分基准站和用户站工作。

3)混合差错控制(HEC)

混合差错控制方式是FEC方式与ARQ方式的结合。发端发送同时具有自动纠错和检查能力的码组,收端接收到码组后,检查差错情况,如果差错在码的纠错能力以内,则自动纠正。如果信道的干扰很严重,错误很多,超过了码的纠错能力,但能检测出来,则经反馈信道请求发端重发这组数据。因此,HEC方式具有FEC和ARQ方式的优点,避免了FEC方式所需的复杂译码器及不能适应信道差错变化的缺点,又克服了ARQ方式信息连贯性差、有时通信效率低的缺点。当然,这种方式限于一对差分GPS基准站和用户站的应用。

4)信息反馈(IRQ)

信息反馈方式也称为回程校验方式。收端把收到的数据原封不动地通过反馈信道送回到发端。发端比较收发数据,若发现有错,则重发一次,直至完全无误为止。

IRQ方式的优点是,不需要纠错、检错编译码器,控制设备和检测设备均非常简单。其缺点在于本来在前向信道中传输无错,而在反馈信道传输时产生了差错,仍导致发端判断收端有错而重发,造成不必要的重复。同时,当接收数据中某一码元内“1”错为“0”,而在反馈时碰巧又将其“0”错为“1”,从而使发端无法发现错误,造成误码输出。这种方式也只适用于一对差分GPS基准站和用户站的情况。

6 GPS测量的误差来源及其影响

GPS测量是通过地面接收设备接收卫星传送的信息确定地面点的位置，所以其误差主要来源于GPS卫星、卫星信号的传播过程和地面接收设备。此外，在高精度的GPS测量中，与地球整体运动有关的地球潮汐、负荷潮及相对论效应等的影响，也是导致其误差的不可忽视的原因。

6.1 与卫星有关的误差

与卫星有关的误差包括卫星星历误差、卫星钟误差、地球自转的影响和相对论效应的影响等。

6.1.1 卫星星历误差

由星历所计算得到的卫星的空间位置与实际位置之差称为卫星星历误差。卫星星历是由地面监控站跟踪监测卫星求定的。由于卫星运行中要受到多种摄动力的复杂影响，而通过地面监控站又难以充分可靠地测定这些作用力或掌握其作用规律，因此在星历预报时会产生较大的误差。在一个观测时间段内，星历误差属于系统误差，是一种起算数据误差。它不仅严重影响单点定位的精度，也是精密相对定位的重要误差来源。

(1)对单点定位的影响

伪距定位的观测方程为：

$$[(X_s^j - X)^2 + (Y_s^j - Y)^2 + (Z_s^j - Z)^2]^{1/2} - c\delta t_k = \rho'^j + \delta\rho_1^j + \delta\rho_2^j - c\delta t^j \tag{6.1}$$

式中：j——卫星号；

ρ'^j——伪距观测值；

$\delta\rho_1^j$、$\delta\rho_2^j$——分别为电离层和对流层的改正项；

δt_k、δt^j——分别为接收机钟差和卫星钟差。

对上式在测站近似坐标(X_0, Y_0, Z_0)处用级数展开，可得如下线性化的观测方程：

$$l_j \mathrm{d}x + m_j \mathrm{d}x + n_j \mathrm{d}z + c\delta t_k = L_j (j = 1,2,3\cdots) \tag{6.2a}$$

$$\text{式中：}\begin{cases} l_j = (x_{sj} - x_0)/\rho_0^j; \\ m_j = (y_{sj} - y_0)/\rho_0^j; \\ n_j = (z_{sj} - z_0)/\rho_0^j; \\ L_j = \rho_0^j - (\rho'^j + \delta\rho_1^j + \delta\rho_2^j - c\delta t^j) \end{cases} \tag{6.2b}$$

若由于卫星星历误差而使ρ_0^j有了增量$\mathrm{d}\rho^j$，由此引起的测站坐标误差为$(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$，引起的接收机时钟误差为$\delta_t$，则$(\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_t)$和$\mathrm{d}\rho^j$之间存在下列关系：

$$l_i\delta_x + m_i\delta_y + n_i\delta_z + c\delta_t = \mathrm{d}\rho^j (j = 1,2,3,\cdots) \tag{6.3}$$

式(6.3)表明，星历误差在测站至卫星方向上影响测站坐标和接收机钟差改正数。影响的

大小取决于 $d\rho^j$ 大小，具体的配赋方式与卫星的几何图形有关。广播星历误差对测站坐标的影响一般可达数米、数十米甚至上百米。

(2)对相对定位的影响

在相对定位中，由于星历误差对两测站的影响具有很强的相关性，所以在求两测站的坐标差时，共同的影响可基本消去，从而获得精度很高的相对坐标。星历误差对相对定位的影响一般采用下列公式估算：

$$\frac{db}{b} = \frac{ds}{\rho} \tag{6.4}$$

式中：b——基线长；

db——由于卫星星历误差引起的基线误差；

ds——星历误差；

ρ——卫星至测站的距离；

$\frac{ds}{\rho}$——星历的相对误差。

实践表明，经数小时观测后基线的相对误差约为星历相对误差的 $\frac{1}{4}$ 左右。当实施 SA 政策时，基线相对误差可能会增大。但就广播星历而言，也能保证 1～2ppm 的相对定位精度，即对应于 10km 和 100km 的基线，它们的精度分别为 10～20mm 和 1～2m。所以，广播卫星只能应用于基线不很长，定位精度要求不很高的相对定位。对于长距离的相对定位，应采用精密星历。

(3)解决星历误差的方法

1)建立区域性卫星跟踪网

建立区域性 GPS 跟踪网，可以实现对 GPS 卫星的独立定轨。这不仅可以使区域内的用户在非常时期不受美国政府有意降低在 C/A 码上的卫星星历精度的影响，而且可以根据计算出的精密星历以 1×10^{-7} 的精度进行相对定位。这将对提高精密定位的精度起显著作用；也可为实时定位提供预报星历。目前，我国已在北京、上海、武汉、西安、拉萨、乌鲁木齐建立 GPS 跟踪站。通过跟踪监测 GPS 卫星信号，精密星历的精度可望达到 0.25m，从而满足 1000km 基线相对定位精度达到 1×10^{-8} 的要求。

2)轨道松弛法

在平差模型中，把卫星星历提供的卫星轨道作为初始值，视其改正数为未知数，通过平差同时求得测站位置及卫星轨道的改正数，这种方法就称为轨道松弛法。通常采用的轨道松弛法有：

①半短弧法：仅将轨道切向、径向和法向三个改正数作为未知数，该方法计算较为简单。

②短弧法：把 6 个轨道偏差改正数作为未知数，通过轨道模型建立观测值和未知数之间的关系。该方法的计算工作量较大，精度与半短弧法大体上相当。

但是，轨道松弛法也存在一定的局限性，因此不宜作为 GPS 定位中的一种基本方法，而只能作为无法获得精密星历情况下某些部门采取的补救措施或在特殊情况下采取的措施。

3)同步观测值求差：

在两个或多个测站上对同一颗卫星的同步观测值求差，减弱卫星星历误差的影响。由于同一卫星的位置误差对不同测站同步观测量的影响具有系统性，所以通过上述求差的方法可

以把两测站的共同误差消除，其残余误差由式(6.4)可知为 $db = b \cdot \frac{ds}{\rho}$。若取 $b = 5km$，$\rho = 25000km$，$ds = 50m$，则 $db = 1cm$。因此，采用相对定位可有效地减弱星历误差的影响。

6.1.2 卫星钟误差

卫星钟的钟差包括由钟差、频偏、频漂等产生的误差，也包含钟的随机误差。在 GPS 测量中，无论是码相位观测，还是载波相位观测，均要求卫星钟和接收机钟保持严格同步。尽管 GPS 卫星采用的是原子钟（铯钟和铷钟），但由于上述因素的影响，卫星钟的钟面时与理想的 GPS 时之间存在着偏差或漂移。这些偏差的总量可达 1ms，产生的等效距离误差可达 300km。

一般地，可以用以下二阶多项式表示卫星钟的这种偏差：

$$\Delta t_s = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \tag{6.5}$$

其中 t_0 为一参考历元，系数 a_0, a_1, a_2 分别表示钟在 t_0 时刻的钟差、钟速及钟速变化率。这些数值由地面监控系统根据前一段时间的卫星跟踪数据和 GPS 标准时推算而得，并通过卫星的导航电文传给用户。经此改正后，各卫星钟之间的同步差可保持在 20ns 以内，由此产生的等效距离偏差不会大于 6m。对于卫星钟的残余误差，则需采用在接收机间求一次差等方法进一步消除。

6.1.3 相对论效应的影响

根据狭义相对论的理论，对于地面观测者而言，安装在高速运动卫星上的卫星钟的频率将变为：

$$f_s = f_0\left[1 - \left(\frac{v_s}{C}\right)^2\right]^{1/2} \approx f_0\left(1 - \frac{v_s^2}{2C^2}\right)^2 \tag{6.6}$$

即

$$\Delta f_s = f_s - f_0 = -\frac{v_s^2}{2C^2}f_0 \tag{6.7}$$

式中：v_s——卫星的运行速度；

C——真空中的光速；

f_0——卫星钟的固有频率。

不难看出，卫星钟比静止在地球上的同类钟慢了。GPS 卫星的平均运行速度为 3874m/s，$C = 299792458m/s$，由此可计算由于狭义相对论效应使卫星钟相对于接收机钟产生的频率偏差为 $\Delta f_1 = \Delta f_s = -0.835 \times 10^{-10} f_0$。

根据广义相对论理论，由于卫星和地面的重力位不同，同一台钟在两处的频率将相差：

$$\Delta f_2 = \frac{W_s - W_r}{C^2} f_0 \tag{6.8}$$

式中：W_s、W_r——分别为卫星上和地面测站处的重力位。

因为广义相对论效应数量很小，可以略日、月引力位，近似得到下列实用公式：

$$\Delta f_2 = \frac{\mu}{C^2} \cdot f_0\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right) \tag{6.9}$$

式中：μ——万有引力常数和地球质量的乘积；

r——接收机至地心的距离；

R——卫星至地心的距离。

取 $\mu = 3.986005 \times 10^{14} m^3/s^2$，$r = 6378km$，$R = 26560km$，由式(6.9)计算得：

$$\Delta f_2 = 5.284 \times 10^{-10} f_0$$

比较可知，对于 GPS 卫星钟的钟频率而言，广义相对论效应的影响比狭义相对论效应的影响大得多，且符号相反。相对论效应的联合影响为：

$$\Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2 = 4.449 \times 10^{-10} f \tag{6.10}$$

上式说明，卫星钟的频率比在地面上的同类钟的频率增加 $4.449 \times 10^{-10} f_0$，所以为了消除相对论效应的影响，在制造卫星钟时应预先把频率降低 $4.449 \times 10^{-10} f_0$，即卫星钟的标准频率为 10.23MHz，生产卫星钟时把频率降为：

10.23MHz × (1 − 4.449 × 10^{-10}) = 10.22999999545MHz。这样，当卫星钟进入轨道受到相对论效应的影响时，其频率正好为标准频率 10.23MHz。

应当指出，上述计算是在卫星轨道为圆形、运动为匀速的情况下进行的，这与实际情况不一致，所以经上述改正后仍有残差。该残差对 GPS 时的影响最大可达 70ns，在精密定位中应该考虑其影响。

6.2 与信号传播有关的误差

与卫星信号传播有关的误差有电离层折射误差、对流层折射误差和多路径效应误差。

6.2.1 电离层折射误差

(1)电离层折射误差的概念及其影响

距地面 50 ~ 1000km 范围的大气层为电离层。由于受到太阳等天体的各种射线辐射，电离层中的气体分子发生电离，形成大量的自由电子和正离子。当 GPS 信号通过电离层时，信号的路径会发生弯曲，传播速度也会发生变化。所以，信号的传播时间与真空中光速的乘积并不等于卫星至接收机的几何距离，该偏差称为电离层折射误差。

电离层中的电子密度较高，属于弥散性介质。电磁波在这种介质内传播时，其速度与频率有关。根据电磁波理论，电离层的群折射率为：

$$n_G = 1 + 40.28 N_e f^{-2} \tag{6.11}$$

电磁波的群速为：

$$v_G = \frac{C}{n_G} = C(1 - 40.28 N_e f^{-2}) \tag{6.12}$$

式中：N_e——电子密度；

f——信号的频率；

C——真空中的光速。

在伪距测量中，若测得信号的传播时间为 Δt，则卫星至接收机的实际距离为：

$$\begin{aligned} \rho &= \int_{\Delta t} v_G \mathrm{d}t = \int_{\Delta t} C(1 - 40.28 N_e f^{-2}) \mathrm{d}t \\ &= C \cdot \Delta t - C \frac{40.28}{f^2} \int_{\rho'} N_e \mathrm{d}\rho' \\ &= \rho - C \frac{40.28}{f^2} \int_{\rho'} N_e \mathrm{d}\rho' = \rho + d_{ion} \end{aligned} \tag{6.13}$$

式中：ρ'——信号传播路径；

$\int_{\rho'} N_e \mathrm{d}\rho'$——电子总量；

d_{ion}——电离层改正；即有：

$$d_{ion}=-C\frac{40.28}{f^2}\int_{\rho'}N_e\mathrm{d}\rho' \tag{6.14}$$

值得注意的是，载波相位测量时的电离层折射改正和伪距测量时的电离层折射改正大小相同，但符号相反。这种距离改正在天顶方向最大可达 50m，在接近地平方向时（高度角为 20°）则达到 150m。所以必须认真加以改正，否则会严重损害观测成果的精度。

(2)减弱电离层折射影响的措施

1)双频观测

对于式(6.14)，令 $A=-C\cdot 40.28\int_{\rho'}N_e\mathrm{d}\rho'$，则有：

$$d_{ion}=\frac{A}{f^2} \tag{6.15}$$

即若用两个不同的频率 f_1 和 f_2 发射卫星信号，它们将沿同一路径到达接收机，它们所对应的电离层改正中的 A 都相同。

GPS 卫星采用的两个载波，其频率分别为 $f_1=1575.42\text{MHz}$，$f_2=1227.60\text{MHz}$，调制在两个载波上的 P 码分别称为 P_1 和 P_2，则有测距公式：

$$\left.\begin{aligned}\tilde{\rho}_1&=\rho_1+A/f_1^2=\rho_1+d_{ion1}\\ \tilde{\rho}_2&=\rho_2+A/f_2^2=\rho_2+d_{ion2}\end{aligned}\right\} \tag{6.16}$$

将两式相减得：

$$\Delta\rho=\rho_1-\rho_2=\frac{A}{f_2^2}-\frac{A}{f_1^2}=\frac{A}{f_1^2}\left(\frac{f_1^2-f_2^2}{f_2^2}\right) \tag{6.17}$$

或

$$\Delta\rho=\frac{A}{f_2^2}\left(\frac{f_1^2-f_2^2}{f_1^2}\right) \tag{6.18}$$

代入数据得：

$$\left.\begin{aligned}d_{ion1}&=1.54573(\rho_1-\rho_2)\\ d_{ion2}&=2.54573(\rho_1-\rho_2)\end{aligned}\right\} \tag{6.19}$$

在用调制在两个载波上的 P 码测距中，除电离层折射的影响不同外，其余误差影响都相同，所以，$\Delta\rho$ 实际上就是用 P_1 和 P_2 码测得的伪距之差，即 $\Delta\rho=(\tilde{\rho}_1-\tilde{\rho}_2)$。因此，有下列距离计算公式：

$$\begin{aligned}\tilde{\rho}_1&=\rho_1+1.54573\Delta\rho=\rho_1+1.54573(\tilde{\rho}_1-\tilde{\rho}_2)\\ \tilde{\rho}_1&=\rho_2+2.54573\Delta\rho=\rho_2+2.54573(\tilde{\rho}_1-\tilde{\rho}_2)\end{aligned} \tag{6.20}$$

经过双频观测值改正后，伪距残差为厘米级。

对于双频载波相位测量观测值 φ_1 和 φ_2，其电离层折射改正与上述分析方法相似，只是电离层折射改正的符号相反，且要引入整周未知数 N_0。

2)利用电离层改正模型加以改正

对于单频接收机，为了减弱电离层的影响，一般采用导航电文提供的电离层改正模型加以改正。该模型把白天的电离层延迟看成是余弦波中的部分，而把晚上的电离层延迟看成是一个常数，如图 6.1 所示。

设电离层改正模型中余弦波的振幅为 A，周期为 P，晚上的电离层延迟量为 DC，余弦波的相位项为 T_P，则任一时刻 t 电离层延迟 T_g 为：

$$T_g=DC+A\cos\left[\frac{2\pi}{P}(t-T_P)\right] \tag{6.21}$$

式中：

$$\left.\begin{aligned} DC &= 5ns, T_P = 14^h(\text{地方时}) \\ A &= \sum_{n=0}^{3}\alpha_n\varphi_m, P = \sum_{n=0}^{3}\beta_n\varphi_m \end{aligned}\right\} \quad (6.22)$$

$$\left.\begin{aligned} t &= UT + \frac{\lambda'_P}{15} \quad (\text{h}) \\ \varphi_m &= \varphi'_P + 11.6\cos(\lambda'_P - 291°)(°) \end{aligned}\right\} \quad (6.23)$$

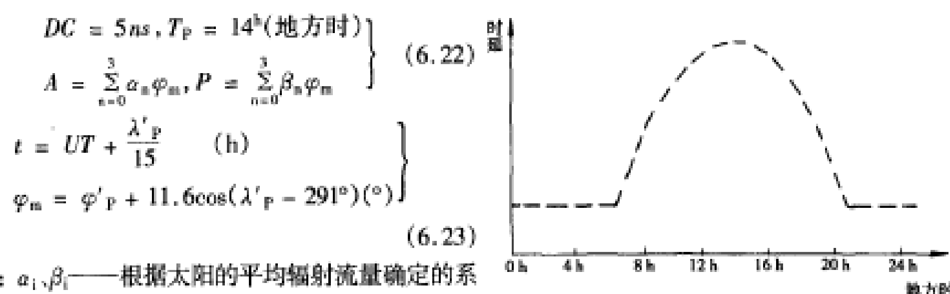


图 6.1　电离层改正模型

式中：α_i、β_i——根据太阳的平均辐射流量确定的系数，被编入导航电文向单频用户传播；

UT——观测时刻的世界时；

φ'_P和λ'_P——某点的地心经纬度。

令 $X = \frac{2\pi}{P}(t - T_P)$，展开 cos$x$ 至三阶项，则有实用公式：

$$T_g = \begin{cases} DC & |x| \geq \frac{x}{2} \\ DC + A\left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24}\right) & |x| < \frac{x}{2} \end{cases} \quad (6.24)$$

当然，根据式(6.24)求得的 T_g 是来自于天顶方向信号的电离层延迟。一般情况下，电离层延迟公式为：

$$T'_g = (1/\cos Z)\cdot T_g = SF\cdot T_g \quad (6.25)$$

$$SF = 1 + 2\left(\frac{96° - E}{90°}\right)^3 \quad (6.26)$$

式中：Z——卫星的天顶距；

E——卫星的高度角。

由于影响电离层折射的因素很多，机制又复杂，所以无法建立严密的数学模型，上述模型基本上是一种经验估算公式。此外，全球统一采用一组系数 α_i 和 $\beta_i(i=0,1,2,3)$，只能大体上反映全球的平均状况，与各地的实际情况必然会有一定的差异。实验资料表明，采用上述电离层延迟改正模型可消除电离层折射的 75% 左右。

3)利用同步观测值求差

利用两台 GPS 接收机在基线的两端进行同步观测，并将观测值求差，则可以消弱电离层延迟的影响，其原因是卫星至两测站电磁波传播路径上的大气状况非常相似，通过对同步观测量的求差可减弱大气状况的系统影响。

该方法对于短基线(小于 20km)的效果尤为明显，经电离层折射改正后基线长度的残差一般为 1ppm × D。但是，随着基线长度的增加，其精度则随之明显降低。所以，该方法适用于短基线的 GPS 测量，即使采用单频接收机也可达到很高的精度。

6.2.2 对流层折射误差

(1)对流层折射误差的概念及其影响

高度为 40km 以下的大气底层为对流层，其大气密度比电离层大，大气状态也更复杂。由于地面辐射热能的影响，对流层的温度随高度的上升而降低，当 GPS 信号通过对流层时，传播的路径则发生弯曲，从而使测量距离产生偏差，这种偏差称为对流层折射误差。

对流层折射与地面气候、大气压力、温度和湿度变化密切相关,比电离层折射的情况更加复杂。对流层折射误差与信号的高度角有关,在天顶方向(高度角为90°)达到2.3m,在地面方向(高度角为10°)则达到20m。

(2)对流层折射改正模型

1)霍普菲尔德(Hopfield)公式

$$\Delta\rho = \Delta\rho_d + \Delta\rho_\omega = \frac{k_d}{\sin(E^2+6.25)^{1/2}} + \frac{k_\omega}{\sin(E^2+2.25)^{1/2}} \tag{6.27}$$

$$\left.\begin{aligned} K_d &= 7.76\cdot\frac{P_s}{T_s}\cdot\frac{1}{5}(h_d-h_s)\cdot 10^{-6} = 155.2\cdot 10^{-7}\frac{P_s}{T_s}\cdot(h_d-h_s) \\ K_\omega &= 7.76\cdot\frac{e_s}{T_s^2}\cdot\frac{1}{5}(h_d-h_s)\cdot 10^{-6} = 155.2\cdot 10^{-7}\frac{4810}{T_s^2}e_s(h_d-h_s) \\ h_d &= 40136+148.72(T_s-273.16) \\ h_\omega &= 11000 \end{aligned}\right\} \tag{6.28}$$

式中：T_s——测站的绝对温度,度;

P_s——测站的气压,毫巴;

e_s——测站的水气压,毫巴;

h_s——测站的高程,米;

E——卫星的高度角,度;

$\Delta\rho$——对流层折射改正值,米。

2)萨斯塔莫宁(Saatamoinen)公式

$$\Delta\rho = \frac{0.002277}{\sin E'}\left[P_s+\left(\frac{1255}{T_s}+0.05\right)e_s-\frac{a}{\tan^2 E'}\right] \tag{6.29}$$

$$\left.\begin{aligned} E' &= E+\Delta E \\ \Delta E &= \frac{16''.00}{T_s}\left(P_s+\frac{4810e_s}{T_s}\right)\mathrm{cotan}E \\ a &= 1.16-0.15\times 10^{-3}h_s+0.716\times 10^{-8}h_s^2 \end{aligned}\right\} \tag{6.30}$$

3)勃兰克(Black)公式

$$\begin{aligned}\Delta\rho = {} & K_d\left\{\left[1-\left(\frac{\cos E}{1+(1-l_0)h_d/r_s}\right)^2\right]^{1/2}-b(E)\right\} \\ & + K_\omega\left\{\left[1-\left(\frac{\cos E}{1+(1-l_0)h_\omega/r_s}\right)^2\right]^{1/2}-b(E)\right\}\end{aligned} \tag{6.31}$$

式中：r_s——测站的地心半径;

参数 l_0 和路径弯曲改正 $b(E)$ 由下式确定：

$$\left.\begin{aligned} l_0 &= 0.833+[0.076+0.00015(T-273)]^{-0.3E} \\ b(E) &= 1.92(E^2+0.6)^{-1} \end{aligned}\right\} \tag{6.32}$$

式(6.34)中的 h_d、h_ω、k_d、k_ω 的含义与前述公式中相同,但按下列公式计算：

$$\left.\begin{aligned} h_d &= 148.98(T_s-3.96) && (\mathrm{m}) \\ h_\omega &= 13000 && (\mathrm{m}) \\ k_d &= 0.002312(T_s-3.96)\frac{P_s}{T_s} && (\mathrm{m}) \\ k_\omega &= 0.20 && (\mathrm{m}) \end{aligned}\right\} \tag{6.33}$$

计算表明，用同一套气象数据，上述三种改正模型求得的天顶方向的对流层延迟的相互较差很小，一般为几个毫米。

然而，由于引起对流层折射误差的因素非常复杂，理论与实践表明，目前采用的各种对流层模型只能减少92%～95%的对流层折射影响。

(3)减弱对流层折射影响的措施

为了进一步削弱对流层折射的影响，可采取下列措施：

1)直接在测站测定气象参数，用于上述对流层折射改正模型。

2)引入描述对流层影响的附加待估参数，在数据处理中一并求得。

3)利用同步观测值求差。当两测站相距不太远时(<20km)，由于信号通过对流层的路径相似，所以对同一卫星的同步观测值进行求差，可以明显地减弱对流层折射的影响。因此，该方法被广泛应用于精密相对定位中。但是，当两测站的距离增大时，其有效性也随之降低。当距离>100km时，对流层折射的影响是限制GPS定位精度提高的重要因素。

6.2.3 多路径效应误差

GPS卫星信号从20000km高空向地面发射，若接收机天线周围有高大建筑物或水面，建筑物和水面对于电磁波具有强反射作用，由此产生的反射波进入接收机天线时与直接来自卫星的信号(直接波)产生干涉，从而使观测值偏离真值产生误差，这种误差称为多路径效应误差。

多路径效应的影响是GPS测量的重要误差源，将严重损害GPS测量的精度，严重时还将引起信号的失锁。因此，应分析产生多路径效应的原因，采取避免或减弱多路径效应误差的措施。

(1)反射波

如图6.2所示，GPS天线接收到的信号是来自卫星的直接信号S和经地面反射后的反射信号S'产生干涉后的组合信号。显然，这两种信号所经过的路径长度是不相等的，反射信号多经过的路径长度称为程差，用Δ表示，不难看出：

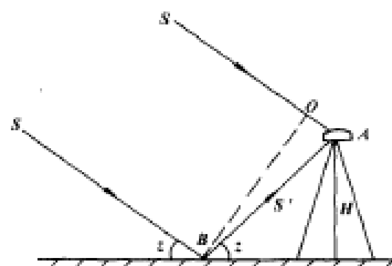


图6.2 多路径效应

$$\Delta = BA - OA = BA(1-\cos 2z) = \frac{H}{\sin z}(1-\cos 2z) = 2H\sin z \tag{6.34}$$

式中：H——天线距地面的高度。

反射波和直接波间的相位延迟为：

$$\vartheta = \Delta \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = 4\pi H \sin z/\lambda \tag{6.35}$$

式中：λ——载波的波长。

(2)多路径效应对载波相位测量的影响

直接波信号可用下式表示：

$$S_d = U\cos\omega t \tag{6.36}$$

式中：U——信号电压；

ω——载波的角频率。

反射波信号的数字表达式为：

$$S_r = \alpha U\cos(\omega\lambda + \theta) \tag{6.37}$$

式中：α——反射物面的反射系数。

天线实际接收的信号为直接波信号与反射波信号的组合信号，其表达式为：

$$S = \beta U\cos(\omega t + \varphi) \tag{6.38}$$

式中：$\beta = (1+2\alpha\cos\theta+\alpha^2)^{1/2}$，$\varphi = \arctan[\alpha\sin\theta/(1+\alpha\cos\theta)]$，$\varphi$ 即为载波相位测量中的多路径效应误差。对 φ 关于 θ 求导并令其等于零：

$$\frac{d\varphi}{d\theta} = \frac{1}{1+\left(\frac{\alpha\sin\theta}{1+\alpha\cos\theta}\right)} \cdot \frac{(1+\alpha\cos\theta)\cdot\alpha\cos\theta+\alpha^2\sin^2\theta}{(1+\alpha\cos\theta)^2}$$

$$= \frac{\alpha\cos\theta+\alpha^2}{(1+\alpha\cos\theta)(1+\alpha\cos\theta+\alpha\sin\theta)} = 0$$

当 $\theta = \pm\arccos(-\alpha)$时，多路径效应误差 φ 有极大值：

$$\varphi_{max} = \pm\arcsin\alpha \tag{6.39}$$

水面的电磁波反射系数为最大，即 $\alpha = 1$，顾及 $\lambda_{L_1} = 19\text{cm}$，$\lambda_{L_2} = 24\text{cm}$，所以 L_1，L_2 载波相位测量中多路径效应误差的最大值分别为 4.8cm 和 6.0cm。

事实上，可能会有多个反射信号同时进入接收天线，此时的多路径效应误差为：

$$\varphi = \arctan\left\{\frac{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\sin\theta_i}{1+\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\sin\theta_i}\right\} \tag{6.40}$$

由此可见，多路径效应对 GPS 测量的精度有非常大的影响。

(3)削弱多路径效应误差的措施

1)选择合适的站址

由于多路径效应不仅与卫星信号的方向和反射物的反射系数有关，而且与反射物距测站的远近有关，所以无法建立其改正模型，只有通过以下措施削弱其影响：

①测站应远离大面积平静的水面，最好选在能较好地吸收微波信号能量的灌木丛、草地和其它地面植被。翻耕后的土地或粗糙不平的地面的反射能力较差，也可选站。

②测站不宜选择在山坡、山谷和盆地中，以避免反射信号从天线抑径板上方进入天线，产生多路径效应误差。

③测站应远离高大建筑物。

2)对接收机天线的要求

在天线中设置抑径板，可减弱多路径效应的影响。如图 6.3 所示，要起到限制反射信号到达接收天线的作用，抑径板的半径 r、高度角 $Z_{限}$ 和抑径板高度 h 之间应满足 $r \geq h/\sin Z_{限}$。若接收机天线相位中心至抑径板的高度 $h = 60\text{mm}$，截止高度 $Z_{角} = 15°$，则抑径板的半径 r 必须大于或等于 $60\text{mm}/\sin15° = 23\text{cm}$。

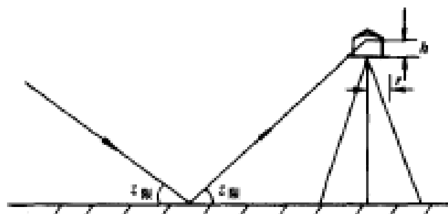


图 6.3　接收机天线的抑径板

6.3 与接收机有关的误差

与接收机有关的误差包括接收机钟误差、接收机安置误差、天线相位中心位置误差以及几何图形强度误差等。

(1)接收机钟误差

GPS接收机内时标一般采用石英晶体振荡器，其稳定度约为10^{-6}。若采用恒温晶体振荡器，其稳定度可达到10^{-9}。假设接收机钟与卫星钟间的同步差为$1\mu s$，则由此引起的等效距离误差约为300m。由此可见，接收机钟差对测量成果的精度影响极大。

减弱接收机钟差的方法有：

1)将每个观测时刻的接收机钟差当作一个独立的未知数，在数据处理中与测站的位置参数一并求解。

2)认为各观测时刻的接收机钟差间是相关的，将其表示为时间多项式，并引入平差模型中一并求解多项式的系数。

3)通过在卫星间求一次差消除接收机的钟差。

(2)接收机安置误差

接收机天线相位中心相对于测站标石中心位置的偏差称为接收机安置误差。它包括天线的整平和对中误差以及天线高的量测误差。若天线高为1.6m，整平误差为0.1°，则会产生3mm的对中误差。因此，在精密定位中，必须认真操作，昼量减少这种误差的影响。在GPS变形监测中，应采用有强制对中装置的观测墩。

(3)天线相位中心位置偏差

GPS测量是以接收机天线的相位中心位置为准的，天线的相位中心与其几何中心在理论上应保持一致。然而，天线的相位中心实际上是随信号输入的强度和方向不同而变化的，即观测时相位中心的瞬时位置(一般称相位中心)与理论上的相位中心将不一致，这种偏差称为天线相位中心位置偏差。这种偏差的影响可达数毫米至数厘米，所以如何减少天线相位中心位置偏差是天线设计中的一个重要问题。

在实际工作中，若在相距不远的两个或多个测站采用同一类型的天线进行同步观测，则可以通过观测值的求差削弱天线相位中心偏移的影响。不过，此时应注意各测站的天线须按附有的方位标志进行定向，使之根据罗盘指向磁北极(偏差$<3°$)。

6.4 其它误差

(1)地球自转的影响

由于地球的自转，当卫星信号传播到测站时，与地球相固联的协议地球坐标系相对卫星的上述瞬时位置已产生了旋转(绕Z轴)。设地球的自转角速度为ω，则旋转的角度为：

$$\Delta\alpha = \omega\Delta\tau_i^j \tag{6.41}$$

式中：$\Delta\tau_i^j$——第i历元的第j颗卫星信号传播到测站的时间延迟。

由此引起的卫星坐标变化为：

$$\begin{bmatrix}\Delta X\\ \Delta Y\\ \Delta Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \sin\Delta\alpha & 0\\ -\sin\Delta\alpha & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X^j\\ Y^j\\ Z^j\end{bmatrix} \tag{6.42}$$

式中：(X^j, Y^j, Z^j)——卫星的瞬时坐标。

一般地，旋转角 $\Delta\alpha < 1.5''$，所以可将 $\sin\Delta\alpha$ 展开并取至一次项。因此，上式可简化为：

$$\begin{bmatrix}\Delta X\\ \Delta Y\\ \Delta Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \Delta\alpha & 0\\ -\Delta\alpha & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X^j\\ Y^j\\ Z^j\end{bmatrix} \tag{6.43}$$

(2)地球潮汐的影响

在太阳和月球的万有引力作用下，地球要产生周期性的弹性形变，这一现象称为固体潮。此外，在日、月引力的作用下，地球上的负荷也将发生周期性的变动，使地球产生周期的形变，该现象称为负荷潮。例如，海潮即为负荷潮。固体潮和负荷潮引起的测站位移可达 80cm，使不同时间的测量结果互不一致，所以在精密相对定位中应考虑其影响。

经研究，由固体潮和海潮引起的测站点的位移值可表示为：

$$\left.\begin{aligned}\delta_\lambda &= \frac{l_2}{g}\frac{\partial U_2}{\partial\lambda} + l_3\frac{\partial U_3}{\partial\lambda} + \frac{4\pi GR}{g}\sum_{i=1}^{n}\frac{l'_i}{2i+1}\frac{\partial\sigma_i}{\partial\lambda}\\ \delta_\varphi &= \frac{l_2}{g}\frac{\partial U_2}{\partial\varphi} + l_3\frac{\partial U_3}{\partial\varphi} + \frac{4\pi GR}{g}\sum_{i=1}^{n}\frac{l'_i}{2i+1}\frac{\partial\sigma_i}{\partial\varphi}\\ \delta_r &= h_2\frac{U_2}{g} + h_3\frac{U_3}{g} + 4\pi GR\sum_{i=1}^{n}\frac{h'_i\sigma_i}{(2i+1)g}\end{aligned}\right\} \tag{6.44}$$

式中：U_2、U_3——日、月的二阶、三阶引力潮位；

σ_i——海洋单层密度；

h_i、l_i——第一、第二勒夫数；

h'_i、l'_i——第一、第二负荷勒夫数；

g——万有引力常数；

R——地球的平均半径。

求出测站的位移量 $\delta = [\delta_\lambda, \delta_\varphi, \delta_r]$，可将其投影到测站至卫星的方向上，从而求出单点定位时观测值中应加的地球潮汐改正数：

$$v = \frac{\delta_\lambda x + \delta_\varphi y + \delta_r z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \tag{6.45}$$

式中：x、y、z——测站点在 WGS—84 中的近似坐标。

若进行相对定位，两个测站均应采用上述方法分别对观测值进行改正。

最后值得指出的是，GPS 测量除含有上述各种误差外，卫星钟和接收机钟振荡器的随机误差、大气折射模型误差和卫星轨道摄动模型误差等也都会对 GPS 的观测值产生影响。目前，人们对长距离定位的精度要求越来越高，所以研究这些误差来源并确定它们的影响规律具有十分重要的意义。

7 GPS 测量控制网的设计与实施

GPS 测量与常规测量工作相似，按照 GPS 测量实施的工作程序可分为以下几个步骤：技术设计、选点埋石、外业准备、外业观测、成果检核与数据处理。GPS 测量是一项技术复杂、要求严格的工作，实施工作的原则是在满足用户精度与可靠度要求下，尽可能地减少人力与物力，因此对各阶段工作必须精心设计、精心组织与实施。本章主要介绍 GPS 测量控制网的设计与实施，对于 GPS 数据处理将在第 8 章详细介绍。

7.1 GPS 控制网的技术设计

7.1.1 GPS 控制网的精度设计

将应用 GPS 定位技术建立的控制网叫 GPS 控制网，其控制点叫 GPS 点。归纳起来可以分为两大类：一类是全球或全国性的高精度 GPS 网，这类网相邻点的距离较长，在数千公里至上万公里，其主要任务是作为全球高精度坐标框架或全国高精度坐标框架，为全球性地球动力学和空间科学方面的科学研究工作服务（或用以研究地区性的板块运动或地壳形变规律等问题，这类网主要是指大地控制网与大面积的安全监测网）。另一类是区域性的 GPS 网，包括城市 GPS 网，GPS 工程网等，这类网相邻点间的距离从几百米至几十公里，其主要任务是直接为国民经济建设服务。

为了满足一定的精度与可靠度的需要，GPS 测量应遵循统一的规范与细则。我国根据不同的任务，制定了不同的规范与规程，如由国家测绘局颁布实施的《全球定位系统（GPS）测量规范》；1998 年国家建设部发布的《全球定位系统城市测量规程》；各部委根据本部门 GPS 工作的实际情况制订了相应的 GPS 测量规程与细则。本章主要参考国家测绘局 2001 年颁布实施的《全球定位系统（GPS）测量规范》。

根据国家测绘局 2001 年颁布实施的《全球定位系统（GPS）测量规范》，GPS 网按其精度可分成 AA、A、B、C、D、E 六级。各级 GPS 网相邻点间基线长度精度用下式表示：

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (b \quad \mathrm{ppm} \times D)^2} \tag{7.1}$$

式中：σ——网中相邻点间的距离中误差（mm）；

a——固定误差（mm）；

b——比例误差（ppm）；

D——相邻点间的距离（km）。

对于不同等级的 GPS 网，其精度要求列于表 7.1。各级 GPS 网的用途详见表 7.2。

对于 C、D、E 级的 GPS 网一般是指专为工程项目布测的工程 GPS 网。这类网的控制区域有限（或一个市或一个地区），边长短（一般从几百米到 20km），观测时间短（从快速静态定位的几分钟至一两个小时）。根据我国现有控制网的状况，GPS 技术主要用于建立新的地面控制网、检核和改善已有地面网、对已有的地面网进行加密。不管什么样的控制网，在实施之前应

首先进行网的技术设计。网的等级与精度标准应根据测区状况、网的用途等来确定。

GPS 网精度分级表　　表 7.1

级别	固定误差 a	比例误差 b	相邻点间平均距离 d(km)
AA	≤3	≤0.01	1000
A	≤5	≤0.1	300
B	≤8	≤1	70
C	≤10	≤5	10～15
D	≤10	≤10	5～10
E	≤10	≤20	0.2～5

各级网的用途表　　表 7.2

级别	用　途	级别	用　途
AA	全球性的地球动力学研究、地壳形变测量、精密定轨	C	大、中城市及工程测量的基本控制网
A	区域性的地球动力学研究、地壳形变测量	D	中、小城市、城镇及测图、地籍、土地信息、房产、物探、勘察、建筑施工等的控制测量
B	局部形变监测和各种精密工程测量	E	

7.1.2　GPS 控制网的基准设计

通过 GPS 测量我们可以获得 WGS—84 坐标系下的地面点间的基线向量，通常情况下我们需要的是国家坐标系(1954 北京坐标系或 1980 西安坐标系)或独立坐标系的坐标。因此对于一个 GPS 网，在技术设计阶段就应首先明确 GPS 成果所采用的坐标系统和起算数据，即 GPS 网的基准设计。

由于 GPS 网为三维网，其基准与常规三维网的基准相似，包括位置基准、方位基准与尺度基准。位置基准一般根据给定起算点的坐标确定，方位基准一般根据给定的起算方位确定，也可以将 GPS 基线向量的方位作为方位基准，尺度基准一般可根据两起算点间的反算距离确定，也可利用电磁波测距边作为尺度基准，或者直接根据 GPS 边长作为尺度基准，可见只要 GPS 的位置、方位、尺度基准确定了，该网也就确定下来了。

在 GPS 控制网的基准设计时，必须注意以下几个问题：

(1)GPS 测量成果转化到我们所需要的地面坐标系，应选择足够的地面坐标系的起算数据与 GPS 测量数据相重合，或者联测足够的地方控制点，以求得坐标转换参数。在选择联测点时，既要考虑充分利用旧资料，以保证资料的连续性，又要考虑 GPS 网的高精度不因旧资料精度低而受损失，同时还应特别注意起算点间的兼容性问题。一般控制网联测起算点的个数不少于 3 个。

(2)若要求所布设的 GPS 网的成果与旧成果吻合最好，则起算点数量越多越好，若不要求所布设的 GPS 网的成果完全与旧成果吻合，则一般可选 3～5 个起算点，这样既可以保证新老坐标成果的一致性，也可以保持 GPS 网的原有精度。为保证整网的点位精度均匀，起算点一般应均匀地分布在 GPS 网的周围。要避免所有的起算点分布在网中一侧的情况。

(3)在布设 GPS 网时，可以采用高精度激光测距边作为起算边长，激光测距边的数量可在 3～5 条左右，它们可设置在 GPS 网中的任意位置，但激光测距边两端点的高差不应过分悬殊。

(4)在布设 GPS 网时，可以引入起算方位，但起算方位不宜太多，起算方位可布设在 GPS

网中的任意位置。

(5)GPS 网经三维平差后，得到的是相对于参考椭球面的大地高，为求得 GPS 网点的正常高，应根据需要适当进行高程联测。AA、A 级网应按二等水准逐点联测高程，B 级网应按三等水准或与其相当的方法至少每隔 2～3 点联测一点的高程，C 级网应按四等水准或与其相当的方法至少每隔 3～6 点联测一点的高程，D、E 级网应按四等水准或与其相当的方法根据具体情况确定联测高程点的点数，一般应均匀分布在整个测区，使测区未知 GPS 点的正常高应尽量为内插。有关 GPS 高程方面的内容在第 9 章有详细介绍。

(6)GPS 网的坐标系统应尽量与测区原有坐标系统一致，若采用独立坐标系，应掌握以下参数：参考椭球、中央子午线、纵横坐标的加常数、坐标系的投影面、测区平均高程异常、起算点的坐标。

7.1.3 GPS 控制网的网形设计

对于常规控制网来说，网形设计十分重要。网形设计的好坏直接关系到建网的费用与网的成果精度，也关系到网的可靠性。对 GPS 网来说，网形设计应在保证质量的前提下，尽可能地提高效率，降低成本。在进行 GPS 网的设计和测设时，既不能脱离实际的应用需求，盲目地追求不必要的高精度和高可靠性；也不能为追求高效率和低成本，而放弃对质量的要求。对于 GPS 网，由于点间不需通视，而且 GPS 网的精度主要取决于观测时卫星与测站间的几何网形、观测数据的质量以及相应的数据处理方法，与 GPS 网形关系不大，这样给 GPS 网的布设带来很大的方便与灵活性，因此 GPS 网的设计主要取决于用户的要求与用途。为了提高观测成果的精度与可靠性，GPS 网中各基线间应能构成一定的检核条件，为此首先了解 GPS 测量的几个基本概念。

(1)GPS 测量的几个基本概念

1)观测时段：测站上开始接收卫星信号到停止接收，连续观测的时间间隔称为观测时段，简称时段。

2)同步观测：两台或两台以上接收机同时对同一组卫星进行的观测。

3)同步观测环：三台或三台以上接收机同步观测所获得的基线向量构成的闭合环，简称同步环，如图 7.1 所示，当 N 大于 2 时，即可构成不同边数的同步环。理论上，同步环中各 GPS 边的坐标差分量之和应等于 0，但由于各 GPS 接收机间不严格同步，以及模型误差和处理软件的内在缺陷，该量不等于 0(称为同步环闭合差)，其值应小于下列规定：

$$\begin{cases} W_x = \sum\limits_{i=1}^{n} \Delta x_i \leqslant \dfrac{1}{5}\sqrt{n}\sigma \\ W_y = \sum\limits_{i=1}^{n} \Delta y_i \leqslant \dfrac{1}{5}\sqrt{n}\sigma \\ W_z = \sum\limits_{i=1}^{n} \Delta z_i \leqslant \dfrac{1}{5}\sqrt{n}\sigma \\ W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \leqslant \dfrac{1}{5}\sqrt{3n}\sigma \end{cases} \tag{7.2}$$

根据网的精度要求，仪器标称精度为 a(mm) + b(ppm) × d(km)；n 为同步环中的边数，σ 为网中相邻点间的距离中误差(mm)，可按式(7.1)计算。

同步环闭合差的大小只能说明 GPS 基线向量的解算是否合格，而不能说明 GPS 基线向量的精度高低，也不能发现接收的信号是否受到干扰而含有粗差。

4)独立基线：由 N 台 GPS 接收机同步观测可得到基线边条数：

$$J = \frac{N(N-1)}{2} \tag{7.3}$$

图 7.1 为 N 台接收机同步观测的图形，随着接收机数量的增加，其构成图形的形状不同，这里只列了其中一种图形。其中相互独立的边为：

$$DJ = N - 1 \tag{7.4}$$

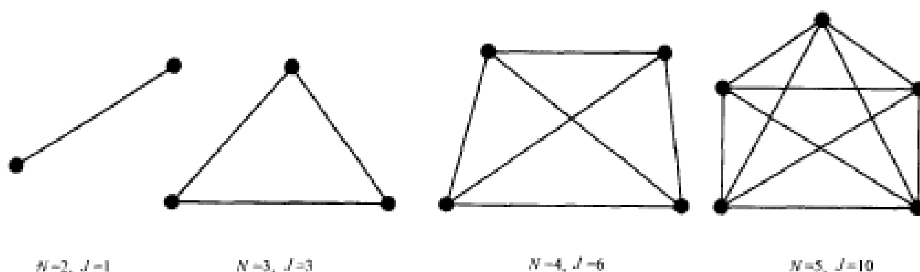


图 7.1 N 台接收机同步观测图形

即这 DJ 条边间相互不能构成任何检核条件，称为独立基线。在 J 条基线边中，DJ 条独立基线的选择有一定的任意性，参加同步观测的接收机的数量越多，选择的方式也越多，如图 7.2 所示。

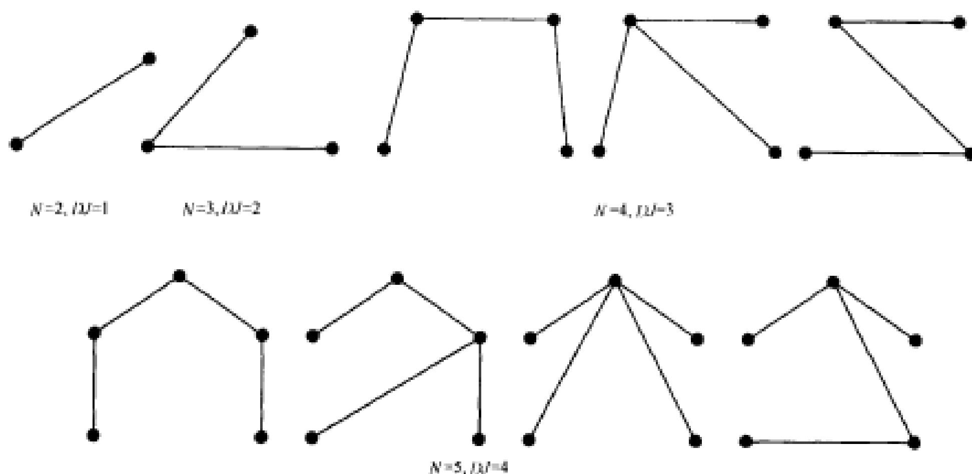


图 7.2 N 台接收机同步观测图形中独立基线的选择

5)独立观测环(异步环)：由非同步观测获得的独立基线向量构成的闭合环，简称独立环或异步环。

不同时段独立基线连在一起即构成 GPS 网。为了确保 GPS 成果的精度与可靠性，有效发现粗差，GPS 网中的独立基线必须构成一些几何图形，构成一些独立环或附合路线，从而形成一些几何检核条件。如构成三角形网、多边形网或附合路线网。根据规范规定，对于 AA、A、B 级 GPS 网布设成连续网，除边缘点外，每点的连接点数应不少于 3 点。C、D、E 级 GPS 网布设成多边形或附合路线。对于各级 GPS 网独立环或附合路线的边数应符合表 7.3 中的规定。

独立环或附合路线的边数规定　　表7.3

级　别	A	B	C	D	E
独立环或附合路线的边数	≤5	≤6	≤6	≤8	≤10

独立环或附合路线的坐标闭合差(环中或路线中各 GPS 边的坐标差分量之和与理论值之差)根据规范规定应满足：

$$\begin{cases} W_x = \sum_{i=1}^{n} \Delta x_i \leq 3\sqrt{n}\sigma \\ W_y = \sum_{i=1}^{n} \Delta y_i \leq 3\sqrt{n}\sigma \\ W_z = \sum_{i=1}^{n} \Delta z_i \leq 3\sqrt{n}\sigma \\ W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \leq 3\sqrt{3n}\sigma \end{cases} \tag{7.5}$$

n 为独立环中的边数，σ 为网中相邻点间的距离中误差(mm)，可按式(7.1)计算。

6)重复基线：同一条 GPS 边若观测了多个时段，可得到多个基线结果，这种边称为重复基线。B 级以下各级 GPS 网要求，同一条边任意两个时段的边长差应满足：

$$d_s \leq 2\sqrt{2}\sigma \tag{7.6}$$

(2)GPS 网常用的几种布网形式

GPS 网常用的布网形式有：跟踪站式、会战式、多基准站式(枢纽点式)、同步图形扩展式以及单基准站式等。

1)跟踪站式

将数台 GPS 接收机长期固定在不同的测站上，进行常年不间断的连续观测，这种方式象类似于跟踪站，因此称为跟踪站式。采用这种形式布设 GPS 网，由于接收机在各个测站上进行了不间断的连续观测，观测时间长、数据量大，多余观测数多，精度高，而且多采用精密星历进行基线解算，因此采用此种形式布设的 GPS 网具有很高的精度和框架基准特性。为保证连续观测，一般需要建立专门的永久性测站，以安置仪器设备，因此这种布网形式的观测成本很高。这种布网形式一般用于建立 GPS 跟踪站(AA 级网)，对于普通用途的 GPS 网，一般不采用这种形式。

2)会战式

会战式布设 GPS 网，一般是指一次组织多台 GPS 接收机，集中在一段不太长的时间内共同作业。GPS 网点分批完成。首先所有接收机分别在同一批点上进行多天、长时段的同步观测，在完成一批点的测量后，再迁移到另外一批点上进行相同方式的观测，直至所有的点观测完毕，这就是会战式的布网。会战式所布设的 GPS 网，因为各基线均进行过较长时间、多时段的观测，精度较高，特别是具有特高的尺度精度，这种布网方式一般用于布设 A、B 级网。

3)同步图形扩展式

同步图形扩展式是指 GPS 网以同步图形的形式连接扩展，并构成具有一定数量独立环的布设形式。首先多台接收机在不同测站上进行同步观测，在完成一个时段的同步观测后，又迁移到其它的测站上进行同步观测，每次同步观测都可以形成一个同步图形，在测量过程中，不同的同步图形间一般有若干个公共点相连。同步图形扩展式的布网形式具有扩展速度快，图形强度较高，且作业方法简单的优点。同步图形扩展式是布设 GPS 网时最常用的一种布网形式。

采用同步图形扩展式布设 GPS 网时，根据同步图形的连接形式不同，又可分为：点连式、边连式、网连式、混连式等。

①点连式

点连式是指只通过一个公共点将相邻的同步图形连接在一起。点连式的布网方案的优点是：作业效率高，图形扩展迅速，但由于不能组成一定的几何图形，形成一定的检核条件，图形强度低，而且一个连接点或一个同步环发生问题，影响到后面所有的同步图形。因此这种布网形式一般不能单独使用。如图 7.3 为 4 台接收机的点连式形式。

②边连式

边连式就是通过一条边将相邻的同步图形连接在一起。如图 7.4 为 4 台接收机的边连式布设形式，与点连式相比可见，边连式观测作业方式可以形成较多的重复基线与独立环，具有较好的图形强度与较高的作业效率。

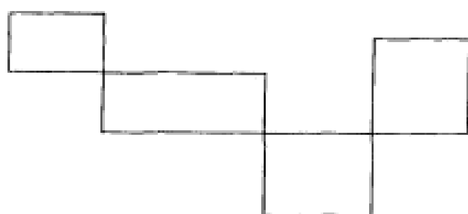


图 7.3　4 台接收机的点连式



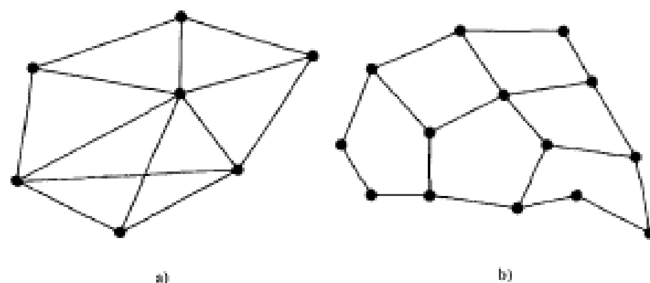
图 7.4　4 台接收机的边连式

③网连式

网连式就是相邻的同步图形间有 3 个以上的公共点，相邻图形间有一定的重叠。显然这种布网方式需要有 4 台以上的接收机。采用这种形式所测设的 GPS 网具有很强的图形强度，但作业效率很低，一般仅适用于精度要求较高的控制网。

④混连式

在实际作业中，由于以上几种布网方案存在这样或那样的缺点，一般不单独采用一种形式，而是根据具体情况，灵活地采用以上几种布网方式，称为混连式。混连式是我们实际作业中最常用的作业方式。如图 7.5 为大地测量与精密工程测量中常用的三角形网、环形网，这种网尽管在图形上以边连接，在作业时其实采用混连式，其优点是自检性与可靠性较好，能有效地发现粗差。



a)　　b)

图 7.5　混连式

a)三角形网；b)环形网

7.2 GPS控制网的外业准备

对于任何一项GPS测量工程项目，在具体的外业开始以前，必须做好一切外业准备工作，以保证整个外业工作的顺利实施。外业准备工作一般包括：测区的踏勘、资料收集、技术设计书的编写、设备的准备与人员安排、观测计划的拟订、GPS仪器的选择与检验等。

7.2.1 测区的踏勘

接到GPS控制网测量任务后，首先应到实地踏勘，了解实地情况，为技术设计书的编写提供依据。通过实地踏勘，结合提出该项任务的目的，主要了解以下情况：

(1)测区的地理位置及其范围、控制网的控制面积；

(2)用途和精度等级：根据控制网的用途，确定GPS网的等级；

(3)点位分布及点的数量：根据控制网的用途与等级，大致确定一下控制网的点位分布、点的数量及密度，并了解一下是否存在对点位分布有特殊要求的区域；

(4)实地交通状况：了解公路、铁路的分布情况；

(5)水系分布情况：了解江河、湖泊、水渠、码头、桥梁的分布情况以及水路交通情况等；

(6)已知控制点分布情况：测区或测区附近已有控制点的数量及分布情况，包括国家等级点、城市控制点、GPS点等，并了解其标志保护状况；

(7)居民点分布情况等。

7.2.2 资料收集

在开始外业测量之前，现有测绘资料的搜集与整理也是一项极其重要的工作。需要收集整理的资料主要包括：

(1)各类图件，如测区地形图、交通图等；测区总体建设规划和近期发展方面的资料；

(2)测区及周边地区可利用的已知点的成果资料，如点之记、坐标、高程以及相应的系统；

(3)测区的地质、气象、交通、通讯等资料；

(4)有关的规范、规程等。

7.2.3 技术设计书的编写

测区外业踏勘与资料收集齐全后，应根据项目要求和相关技术规范进行控制网的技术设计，设计书的内容主要包括以下内容：

(1)概述　包括项目来源、性质、用途及意义；项目总体概况，如总体工作量等；测区概况；测区隶属；测区范围的地理坐标、控制面积；测区交通状况、地形及气候状况；人文地理、时间要求等。

(2)作业依据　列出完成该项目所需的所有的测量规范、工程规范、行业标准。

(3)技术要求　根据甲方要求或网的用途提出具体的精度指标要求、提供成果的坐标系统等。

(4)测区已有资料　列出所收集到的测区资料，特别是测区已有控制点的资料，包括控制点的数量、点名、坐标、高程以及所属系统。

(5)布网方案　根据测区踏勘与项目要求，在适当比例尺的地形图上进行GPS网的设计，

包括网形、网点数、连接形式，GPS网中包含的同步环、异步环的个数估计、精度估算等。

(6)选点与埋标　GPS点布设的基本要求，点位标志的类型、规格，埋设要求，点的编号等。

(7)GPS网的观测　采用的仪器与测量模式，观测的基本程序与观测的基本要求，包括观测纲要、时间、时段等。外业观测时的具体操作规程，包括仪器参数的设置（如采样间隔、截止高度角等）、对中精度、整平精度、天线高的量测方法及精度要求等。

(8)观测数据处理

①包括数据的下载、基线解算的软件、方法，对基线解算的要求、外业观测的成果检核，如同步环、异步环、重复基线的闭合差的限差要求，以及对重测、补测的要求。

②数据处理软件与方法，包括三维无约束平差、约束平差、坐标转换等。

(9)质量保证措施 完成该项目拟采取的质量保证措施。

(10)人员配备情况

(11)设备配备情况

(12)验收与上交资料 项目完成后需要提交的成果。

7.2.4 设备的准备与人员安排

根据技术设计书，进行设备准备与人员组织：

(1)观测仪器、数据处理设备的筹备；

(2)交通、通讯设施的准备；

(3)GPS点埋标的施工材料以及其它耗材的准备；

(4)组织测量队伍，并进行必要的培训、教育。

7.2.5 观测计划的拟定

(1)拟定原则

为了外业观测工作能顺利、保质、保量地完成，必须拟定严密的观测计划。观测计划的拟定主要根据以下几个方面考虑：

1)根据网的精度要求确定所需的观测时间、时段数；

2)网的规模大小；

3)作业期间的卫星星历状况；

4)接收机的数量；

5)测区交通状况、交通设备状况、后勤保障等。

(2)观测计划的内容

1)利用星历预报软件，编制测区卫星可见性预报表、卫星出现的方位、观测时卫星几何强度因子等，选择最佳的观测时段；

2)结合观测要求、各点的周围环境、交通状况等情况制定详细的工作计划、工作日程、人员调度表、观测要求一览表等。

7.2.6 GPS仪器的选择与检验

GPS仪器的型号多样，精度、性能各不相同，接收机类型的选择应按网的精度要求来定。对不同等级的网，GPS接收机的选择应按规范规定执行，详见表7.4。

GPS 接收机的选用 表 7.4

级　别	AA	A	B	C	D、E
单频/双频	双频/全波长	双频/全波长	双频	双频或单频	双频或单频
观测量最少	L1、L2	L1、L2	L1、L2	L1	L1
同步观测接收机数	≥5	≥4	≥4	≥3	≥2

对于选定的接收机在参加作业之前，首先应对其性能与可靠性进行检验，合格后才可使用。GPS 接收机的全面检验包括：一般检视、通电检验、试测检验。

(1)一般检视

1)GPS 接收机及天线外观应良好，型号正确；

2)各种部件及附件应匹配、齐全、完好；

3)需紧固的部件不得松动和脱落；

4)设备使用手册和后处理软件操作手册及磁(光)盘应齐全。

(2)通电检验

1)有关信号灯工作正常；

2)按键和显示系统工作正常；

3)利用自测试命令进行测试必须通过；

4)检验接收机锁定卫星信号的快慢，接收信号的强弱及信号失锁状况。

(3)试测检验

GPS 接收设备一般检视与通电检验后，应在不同的基线上进行以下测试：

1)接收机内部噪声水平检验

接收机内部噪声是接收机钟差、信号通道时延、延迟锁相环误差以及机内噪声所引起的定位误差的综合反映。一般采用零基线测试法与超短基线测试法。

①零基线测试法

采用功率分配器将同一天线输出的信号分成功率、相位相同的两路或多路信号送到不同接收机，然后对观测数据进行差分处理，求得不同接收机间的坐标差。由于信号来自同一个天线，其坐标差理论值应为 0，所以称为零基线测试法。由于这种方法可以消除卫星几何形状的影响、天线相位中心偏移、对流层延迟的影响、多路径效应以及仪器对中误差等的影响，所以检验的是接收机内部噪声水平。其具体检验方法是：

选择一开阔的地方，在高度角 10°的范围内没有遮挡，安置天线，将天线连接到功分器上，然后将功分器分出的两路线路分别连接一台接收机，接通电源两接收机同步接收 4 颗以上卫星信号 1.5 小时；交换接收机与功分器接口，再观测一个时段，用随机软件解算基线坐标差与基线长度，坐标增量应小于 1mm，否则应送厂检修或降级使用。

②超短基线测试法

当无功分器时，可采用该法。在平坦、在高度角 10°以上的范围内没有遮挡的地方，选择长度为 5～10m 的基线，用鉴定过的钢尺量距。将两台接收机分别安置在基线两端，并严格对中、整平、量取仪器高、天线定向标志指北，同步观测 1.5 小时，进行基线解算，GPS 基线长度与地面测量值之差应小于仪器标称值。

2)天线相位中心稳定性检验

天线相位中心的稳定性是指天线在不同方位下的实际相位中心与厂家提供的天线几何中心的重合程度。这项检验可在标准基线、比较基线场或 GPS 检测场上进行。检验时，将 GPS

接收机天线分别安置在基线的两端，精确对中、整平，并使天线的定向标志指北，观测一个时段（大约 1.5 小时），然后一个天线（A）不动，另一天线（B）依次旋转 90°、180°、270°，再测三个时段，观测结束，解算各时段的基线值，天线在不同方位下测定的基线变化最大互差应小于仪器标称精度的 2 倍固定误差，说明 B 天线合格，否则应送厂检修或降级使用。然后固定 B 不动，同样的方法可测定 A 天线是否合格。

3）GPS 接收机不同测程精度指标的测试

该项检验主要是测试 GPS 接收机能否达到其标称精度，一般应在标准检定场进行，因为标准检定场有短、中、长基线边。要求标准基线的精度达到 10^{-5}。检验时，将 GPS 接收机天线分别安置在基线的两端，精确对中、整平，并使天线的定向标志指北，一般要求强制对中，天线高的量取精确至 1mm，观测时间因测量模式的不同而不同。测试结果与基线标准长度之差应小于仪器的标称精度。

7.3 GPS 控制网的外业实施

外业准备工作完成后，便可进入具体实施阶段，包括外业实施与内业数据处理，这里主要讨论外业实施，内业数据处理在第 8 章有详细介绍。GPS 控制网测量的外业实施主要包括控制点的选点埋石、外业观测、观测成果的外业检核等工作。本节主要介绍控制点的选点埋设与外业观测两部分，关于观测成果的外业检核将在本章 7.5 节详细介绍。

7.3.1 选点与埋石

（1）选点

由于 GPS 测量不需要点间通视，而且网的结构也较灵活，因此选点工作较常规测量要简便得多。但点位选择的好坏关系到 GPS 观测能否顺利进行，关系到 GPS 结果的可靠性，因此选点工作十分重要。选点前，选点人员应做好选点的准备工作，包括收集有关布网任务、测区资料、已有各类控制点、卫星跟踪站的资料，充分了解和研究测区情况，特别是交通、通讯、供电、气象等情况。对于一个 GPS 点，其点位的基本要求是：

1）周围便于安置接收设备和操作，视野开阔，视场内障碍物的高度角不宜超过 15°；

2）远离大功率无线电发射源（如电视台、电台、微波站等），其距离应大于 200m；远离高压输电线和微波无线电传送通道，其距离应大于 50m；

3）附近不应有强烈反射卫星信号的物件（如大型建筑物等）；

4）交通方便，并有利于其它测量手段扩展和联测；

5）地面基础稳定，易于点的保存；

6）充分利用符合要求的旧控制点，当利用旧点时，应对旧点的稳定性、完好性、以及觇标是否安全可用性作一检查，符合要求方可利用。

另外对于不同用途的控制点还应考虑其建成后的利用问题，如对于一些工程控制网，其作用是为工程的施工放样服务，而施工放样目前所采用的仪器为常规测量仪器，因此仍需保证 GPS 点至少有两点直接通视。同时考虑到放样点与直接通视的 GPS 点构成的图形强度要好，控制点应尽量避开施工区，减少施工时网点的破坏等。

选点人员按照技术设计书经外业踏勘，根据以上要求在地面上标定点位，并命名，绘制点之记草图。点名一般取居民地名，C、D、E 级 GPS 点也可取山名、地名、单位名，并向当地政府

部门或群众进行调查确认。点号的编排应便于计算机管理。

(2)选点资料整理

选点结束后,应提交下列资料:

1)点之记及点的环视图;

2)GPS 网选点图;

3)选点工作总结。

(3)埋石

GPS 点应埋设具有中心标志的标石,以精确标定点位。点的标志与标石必须稳定、坚固,以利于长久保存与利用。对于用于变形监测的 GPS 点,更应该建立便于长久保存的标志,以获得两期变化的精确量。为了提高 GPS 测量的精度,减少对中误差,方便使用,可以建造强制对中观测墩。关于标石的类型、构造可参阅 GPS 测量规范。

所有点位埋石结束后,应认真绘制点之记,并待埋石点稳定一段时间,方可进行观测。

7.3.2 外业观测

(1)GPS 观测的基本技术规定

GPS 测量与常规测量一样,在外业观测过程中必须满足一些基本技术要求,各级 GPS 网测量需遵守表 7.5 的有关规定。

GPS 测量基本技术要求规定 表 7.5

项目 \ 级别			AA	A	B	C	D	E
卫星截止高度角			10°	10°	15°	15°	15°	15°
同时观测有效卫星数			≥4	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
有效观测卫星总数			≥20	≥20	≥9	≥6	≥4	≥4
观测时段数			≥10	≥6	≥4	≥2	≥1.6	≥1.6
时段长度(min)	静态		≥720	≥540	≥240	≥60	≥45	≥40
	快速静态	双频+P码				≥10	≥5	≥2
		双频全波				≥15	≥10	≥10
		单频				≥30	≥20	≥15
采样间隔(s)	静态		30	30	30	10~30	10~30	10~30
	快速静态					5~15	5~15	5~15
时段中任一卫星有效观测时间(min)	静态		≥15	≥15	≥15	≥15	≥15	≥15
	快速静态	双频+P码				≥1	≥1	≥1
		双频全波				≥3	≥3	≥3
		单频				≥5	≥5	≥5

对于建立测量控制网而言,为了保证得到高精度的成果,一般采用静态相对定位或快速静态相对定位。

(2)GPS 观测的过程

GPS 观测的过程包括天线安置、观测作业、观测记录、观测成果的外业检核等四个过程。

1)天线安置

天线的正确安置是获取点位精确成果的前提。天线安置需满足下列要求：

①对于控制测量，天线一般应尽可能利用三脚架直接安置在标志中心的垂直方向上，对中误差不大于 3mm，特殊情况下可进行偏心观测，必须精密测定归心元素。对于 B 级以上网不允许在高标上安置天线。

②需要在觇标的基板上安置天线时，应先卸去觇标顶部，将标志中心投影到基板上，然后以投影点安置天线，投影点示误三角形的最长边或示误四边形的长对角线不得大于 5mm。

③当控制点上建有寻常标时，应在安置天线前放倒觇标或采取其它措施（当边长小于 10km 时，可在其下安置天线，但应适当延长观测时间）。

④为消除相位中心偏差对测量结果的影响，安置天线时用罗盘定向使天线指北线严格指向北方，定向误差根据定位的精度不同而异，一般不超过 3°～5°。

⑤天线集成体上的圆水准气泡必须居中，没有圆水准气泡的天线可调整天线基座脚螺旋，使在天线互为 120°方向上量取的天线高互差小于 3mm。

⑥架设天线不宜过低，一般应距地面 1.5m 以上。天线架设好后，在圆盘天线间隔 120°方向上分别量取的天线高，三次量取结果互差须小于 3mm，取其平均值记入测量手簿，并在各时段前后分别量取一次。

2）观测作业

通过观测作业，采集 GPS 卫星信号，以获取定位所需的数据。对于具体的操作方法因接收机的型号不同而异，GPS 接收机都随机带有操作手册，具体操作按操作手册执行。作业时应满足以下作业要求：

①观测组必须严格遵守调度命令，按规定的时间进行作业。

②检查接收机电源电缆和天线等各项连接无误后，方可开机。

③开机后经检验有关指示灯与仪表显示正常后，方可进行自测试并输入测站、采样间隔等控制信息。

④接收机启动前与作业过程中，应随时逐项填写测量手簿中的记录项目，GPS 测量手簿记录格式、内容可参考 GPS 规范。

⑤接收机开始记录数据后，观测员可通过专用功能键和选择菜单，查看测站信息、接收卫星数、卫星号、卫星健康状况、信噪比、相位测量残差、实时定位的结果及其变化、存储介质记录和电源情况，如发现异常，应作记录，并及时报告调度者。

⑥每时段观测开始时与结束前各记录一次观测卫星号、天气状况、实时定位经纬度和大地高、PDOP 值等。须观测记录气象元素的高等级 GPS 网点，每时段气象观测应不少于 2 次，一次在时段开始时，一次在时段结束时。

⑦每时段观测前后应各量取天线高一次，两次量高之差不应大于 3mm，取平均值作为最后天线高。

⑧观测员要细心操作，观测期间防止接收设备震动，更不得移动，要防止人员和其它物体碰动天线或阻挡信号。

⑨观测期间，不得在天线附近 50m 以内使用电台，不得在天线附近 10m 以内使用对讲机。

⑩天气太冷时，接收机应适当保暖；天气太热，接收机应避免阳光直接照晒，确保接收机正常工作。

在一时段观测过程中不允许进行以下操作：接收机关闭又重新启动、进行自测试、改变卫星高度角、改变数据采样间隔、改变天线位置、按动关闭文件和删除文件等功能键。在 GPS 快

速静态定位测量中的同一观测单元期间，参考站观测不能中断，参考站和流动站采样间隔要相同，不能变更。

3）观测记录

外业观测过程中，所有的观测数据和资料都应妥善记录。GPS 测量的观测记录与常规测量有所不同，它包括两部分：由接收机完成的观测记录与由人工完成的记录手簿。

观测记录主要由接收机自动完成，即将 GPS 卫星信号与外业设置的测站控制信息以及接收机工作状态等记录在存储介质上。

记录手簿主要在接收机启动前与作业过程中，应随时逐项填写测量手簿中的记录项目，GPS 测量手簿记录格式、内容可参考 GPS 规范。

7.3.3 归心元素的测定与计算

在实际作业过程中，有时会遇到要在具有钢标的点上进行 GPS 测量，直接在标石上安置天线势必影响信号的接收，为此采用偏心观测，这里介绍偏心观测中归心元素的测定与计算。

(1)归心元素的测定

1)GPS 方法

如图 7.6 所示，P 为标志中心，A 为偏心 GPS 点，B 为 GPS 方位点。在 A、B 点上安置接收机，观测一个时段后，交换天线，再观测一时段，共两时段，获得 A、B 点 WGS—84 坐标。用经纬仪以三等三角测量的要求观测水平角 γ_1，γ_2 各 4 测回，用红外测距仪，观测 4 测回，得到 AP 间的距离 S_{AP}与 BP 间的距离 S_{BP}，用水准测量或经纬仪三角高程方法分别测出 PA 间的高差 h_{AP}与 PB 间的高差 h_{BP}，即可计算出 Δx_{AP}，Δy_{AP}，Δh_{AP}与 α_{AP}。

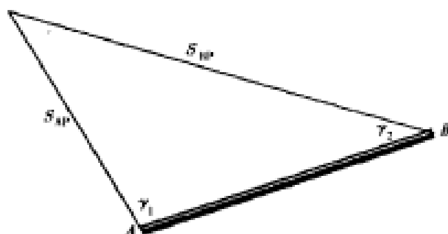


图 7.6　偏心观测图

2)纯 GPS 方法

在 A、P 点上安置接收机，观测一时段后，交换天线再观测一时段，共两时段，获得 A、P 点间的 WGS—84 坐标系坐标差 Δx_{AP}，Δy_{AP}，Δz_{AP}。时段长度：双频接收机不得少于 30min，单频接收机不得少于 1h。

3)三角联测方法

若已知 P 点至某一方向的大地方位角，可通过 P 点上对该方向与 PA 方向间角度观测求出 α_{PA}，进而得到 α_{AP}。按三等三角测量要求，角度观测 4 测回。

(2)归心元素计算

已知 A、B 两点的 WGS—84 空间直角坐标分别为 X_A，Y_A，Z_A 与 X_B、Y_B、Z_B，以 A 点坐标为原点，求得 B 点在 A 点站心坐标系中的站心地平坐标。

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_A \cos L_A & -\sin B_A \sin L_A & \cos B_A \\ -\sin L_A & \cos L_A & 0 \\ \cos B_A \cos L_A & \cos B_A \sin L_A & \sin B_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} \tag{7.7}$$

$$B_A = \tan^{-1}(Z_A / \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}) \tag{7.8}$$

$$L_A = \sin^{-1}(Y_A / \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}) \tag{7.9}$$

然后按下式计算 α_{AP}：

$$\alpha_{AB} = \tan^{-1} y_B / x_B \tag{7.10}$$

$$\alpha_{AP} = \alpha_{AB} + (360° - \gamma_1) \tag{7.11}$$

$$\alpha_{PA} = \alpha_{AP} - 180° = \alpha_{AB} + 180° - \gamma_1 \tag{7.12}$$

$$\Delta x_A = S_{AP} \cos\alpha_{PA} \tag{7.13}$$

$$\Delta y_A = S_{AP} \sin\alpha_{PA} \tag{7.14}$$

$$\Delta z_A = \Delta h_{AP} = h_{AP} \tag{7.15}$$

式中：Δz_A 在 A 点高于 P 点时取正，反之取负。用类似的公式和方法，可求得归心元素 Δx_B 和 Δy_B 和 Δh_{BP}。

为检核 Δx_A、Δy_A 与 Δh_{AP}计算得正确性，可依下列公式分别求出 P 点球心直角坐标。

$$\begin{bmatrix} x_{PA} \\ y_{PA} \\ z_{PA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_A \cos L_A & -\sin L_A & \cos B_A \cos L_A \\ -\sin B_A \sin L_A & \cos L_A & \cos B_A \sin L_A \\ \cos B_A & 0 & \sin B_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_A \\ \Delta y_A \\ \Delta z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} \tag{7.16}$$

$$\begin{bmatrix} x_{PB} \\ y_{PB} \\ z_{PB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_B \cos L_B & -\sin L_B & \cos B_B \cos L_B \\ -\sin B_B \sin L_B & \cos L_B & \cos B_B \sin L_B \\ \cos B_B & 0 & \sin B_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_B \\ \Delta y_B \\ \Delta z_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \tag{7.17}$$

$$\begin{cases} \Delta x_P = x_{PA} - x_{PB} \\ \Delta y_P = y_{PA} - y_{PB} \\ \Delta z_P = z_{PA} - z_{PB} \end{cases} \tag{7.18}$$

$$\Delta R = \sqrt{\Delta x_P^2 + \Delta y_P^2 + \Delta z_P^2} \tag{7.19}$$

ΔR 应小于 $4\sqrt{3}$mm。

7.4 GPS 测量的作业模式

确定两点间的相对位置的作业方法称为作业模式。随着 GPS 技术的快速发展，出现了多种作业模式。不同的作业模式因作业方法和观测时间不同，具有不同的应用范围。目前普遍使用的作业模式主要有：静态相对定位、快速相对静态定位、准动态相对定位和动态相对定位。

(1)静态相对定位模式

这种定位模式的作业方法是将两台或多台 GPS 接收机分别安置在一条或多条基线的两端，同步观测 4 颗以上卫星，观测时间在 45min 以上。采用这种方法其基线相对定位精度可达 5mm + 1ppm × d，d 为基线长度。一般采用这种方法作业时，使观测基线构成一系列的闭合环，

用于外业检核，因此其观测精度与可靠性较高。主要应用于全国性或国家级大地控制网的建立、地壳运动或工程变形监测网的建立、精密工程控制网的建立等。

(2)快速静态定位模式

这种作业模式是依赖于GPS定位的计算方法与软件改进而产生的，整周模糊度的快速解算使GPS定位的速度大大提高，应用双频接收机只需同步观测5～10min，单频接收机观测15min左右，即可达到与静态相对定位相当的精度。在具体作业过程中，一般在测区中央选择一基准站，并安置一台接收机连续跟踪所有可见卫星，另一台接收机依次到各流动站，每点观测几分钟即可。接收机移动过程中，可关闭电源。这种方法的优点是速度快、精度高、能耗低，缺点是构不成闭合环，可靠性差，因此主要应用于一般控制网的测量与加密、工程测量、地籍测量及碎部测量等。

(3)准动态定位

这种作业方法要求在测区选择一个基准点，安置接收机连续跟踪所有可见卫星(5颗以上卫星)；将另一台流动接收机先置于第一点观测1～2min；在保持对所测卫星连续跟踪不失锁的情况下，将流动接收机分别在2、3、4……各点观测数秒钟。该方法的定位的基线中误差约为1～2cm。主要应用于开阔地区的加密控制测量、工程定位及碎部测量、剖面测量及线路测量等。

(4)动态定位

其作业方法是在一个基准点上安置一接收机，连续跟踪所有可见卫星；另一台接收机安置在运动载体上，先在出发点上静态观测数分钟；然后运动的接收机从出发点开始，按指定的时间间隔自动测定运动载体的位置，如果通过数据链将基准站的数据实时传输给流动站，就可实时定位。该方法相对于基准点的瞬时点位精度1～2cm。主要应用于精密测定运动目标的轨迹、测定道路的中心线、剖面测量、航道测量等。但需注意该方法需同步观测5颗以上卫星，其中至少4颗卫星要连续跟踪；流动点与基准点相距不超过20km。

(5)实时动态定位

实时动态(REAL TIME KINEMATIC－RTK)测量技术，是以载波相位观测量为根据的实时差分GPS测量技术，它是GPS测量技术发展中的一个新突破。实时动态测量的基本思想是，在基准站上安置一台GPS接收机，对所有可见GPS卫星进行连续地观测，并将其观测数据，通过无线电传输设备，实时地发送给用户观测站。在用户站上，GPS接收机在接收GPS卫星信号的同时，通过无线电接收设备，接收基准站传输的观测数据，然后根据相对定位的原理，实时地计算并显示用户站的三维坐标及其精度。其主要应用于航空摄影测量和航空物探中采样点的实时定位，航道测量，道路中线测量，以及运动目标的精密导航等。目前，实时动态测量系统，已在约20km的范围内，得到了成功的应用。相信，随着数据传输设备性能和可靠性的不断完善和提高，随着数据处理软件功能的增强，它的应用范围将会不断地扩大。

7.5 观测成果的外业检核

7.5.1 观测成果的外业检核

GPS外业观测成果的检核是确保外业观测质量、提高观测精度的重要环节。一般将每天的观测数据及时下载到计算机，然后用随机软件进行基线解算，进行同步环、异步环等的外业

数据检核，发现不合格的数据，根据情况及时重测或补测。

观测成果的外业检核主要包括：

(1)同一时段观测值的数据剔除率

同一时段观测值的数据剔除率是指同一时段中删除的观测值个数与获取的观测值总数之比。其值不超过10%。

(2)同步观测环

同步环坐标闭合差应小于式(7.2)的要求。

(3)独立观测环

独立环或附合路线的坐标闭合差根据规范规定应满足式(7.5)的要求。

(4)重复基线

同一条边任意两个时段的边长差应满足式(7.6)的要求。

7.5.2 重测和补测

在外业观测过程中，当出现不合格的数据情况时，应根据具体情况进行重测与补测。

(1)未按施测方案要求，外业缺测、漏测，或数据处理后，观测数据不满足表7.1的规定，有关成果应及时补测。

(2)允许舍弃在重测基线边长较差、同步环闭合差、独立环或附合路线闭合差检验中超限的基线，而不必进行该基线或该基线有关的同步图形的重测，但必须保证舍弃基线后的独立环所含基线数，不超过表7.3的规定，否则应重测该基线有关的同步图形。

(3)由于点位不满足GPS测量要求而造成一个测站多次重测仍不能满足各种限差检核要求时，经主管部门批准，可以布设新点重测或者舍弃该点。

(4)对需补测或重测的观测时段或基线，要具体分析原因，在满足观测要求的前提下，尽量安排一起进行同步观测。

(5)补测或重测的分析应写入数据处理报告。

8 GPS 测量的数据处理

GPS 接收机采集的是接收机天线相位中心至卫星发射中心的伪距、载波相位和卫星星历等数据，而不是常规测量技术所测的地面点间的相对位置关系量(如边长、角度、高差等)。因而要想得到有实用意义的测量定位成果，需要对采集到的数据进行一系列的处理。

8.1 数据处理的基本程序

GPS 测量数据处理是指从外业采集的原始观测数据到最终获得测量定位成果的全过程。大致可以分为数据的粗加工、数据的预处理、基线向量解算、GPS 基线向量网平差或与地面网联合平差等几个阶段。数据处理的基本流程如图 8.1 所示。

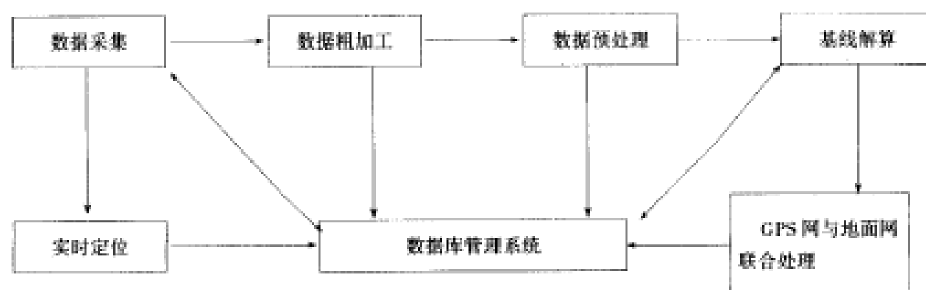


图 8.1 GPS 数据处理基本流程图

图中第一步数据采集和实时定位在外业测量过程中完成；数据的粗加工至基线向量解算一般用随机软件(后处理软件)将接收机记录的数据传输至计算机，进行预处理和基线解算；GPS 网平差可以采用随机软件进行，也可采用国内外高校或科研机构开发的专用平差软件包来完成。

8.1.1 GPS 测量数据的粗加工

GPS 测量数据的粗加工包括数据传输和数据分流两部分内容。

大多数 GPS 接收机采集的数据记录在接收机内存模块上。在数据通过专用电缆线从接收机传输至计算机的同时完成数据的分流，以将各类数据按照类别特性归入不同的数据文件中。数据传输和分流未作任何实质性的加工处理，只是存储介质的变换。

不同接收机的数据记录格式各不相同，难被同一处理程序所用。因而传输至计算机的数据还需解译，提取出有用信息，分别建立不同的数据文件，其中最主要的是生成四个数据文件：载波相位和伪距观测值文件、星历参数文件、电离层参数和 UTC 参数文件、测站信息文件。

(1)观测值文件。这是容量最大的文件，内含观测历元，C/A 码伪距、载波相位(L_1/L_2)、积分多普勒计数、信噪比等等，其中最主要的是伪距和载波相位观测值。

(2)星历参数文件。包括所有被测卫星的轨道位置信息，根据这些信息可以计算出任一时

刻的卫星在轨道上的位置。

(3)电离层参数和 UTC 参数文件。电离层参数可用于改正观测值的电离层影响，UTC 参数则用于将 GPS 时间修正成 UTC 时间。

(4)测站信息文件。其中包括测站的基本信息和本测站上的观测情况。例如：测站名、测站号、测站的概略坐标、接收机号、天线号、天线高、观测的起止时间、记录的数据量、初步定位结果等。

8.1.2 GPS 测量数据的预处理

GPS 测量数据的预处理的目的在于：对数据进行平滑滤波检验，剔除粗差，删除无效无用数据；统一数据文件格式，将各类接收机的数据文件加工成彼此兼容的标准化文件；GPS 卫星轨道方程的标准化，一般用一多项式拟合观测时段内的星历数据；探测并修复整周跳变，使观测值复原；对观测值进行各种模型改正，如大气折射模型改正。

预处理所采用的模型和方法的优劣，将直接影响最终成果的质量，因而是提高 GPS 测量作业效率和精度的重要环节。目前，GPS 测量数据的预处理大致具有以下四项内容：

(1)GPS 卫星轨道方程的标准化

在 GPS 数据处理中要多次进行卫星坐标的计算，而卫星的广播星历每小时播发一组独立的星历参数，使得计算工作十分繁杂。卫星轨道方程标准化的主要目的就是以统一的格式提供观测时段内被测卫星的轨道位置，从而使卫星轨道计算简便，并且在观测时段内是连续轨道。

GPS 卫星轨道方程的标准化通常采用以时间为变量的多项式进行拟合处理。将已知的多组不同历元的星历参数所对应的卫星位置 $P_i(t)$ 表达为时间 t 的多项式形式：

$$P_i(t) = \sum_{j=0}^{n} a_{ij} t^j \tag{8.1}$$

这里的 P 分别是 X、Y、Z 坐标的多项式函数；$a_{ij}(i = X, Y, Z; j = 0, 1, \cdots, n)$ 是多项式系数；t 为时间变量。

利用多项式拟合法求解各系数 a_{ij}，并记入标准化星历文件，此后就可以用它们来计算任意时刻的卫星位置。通常多项式的拟合阶数 n 取 8 ~ 10 就是足以保证米级至厘米级轨道拟合的数字精度。这种用多项式拟合来计算 GPS 卫星坐标具有速度快、占用内存少的特点。

在实际拟合计算时，应考虑 t 的单位问题。如果 t 以秒为单位，则 t_n 与 1 相比是一非常大的数字，可能会导致计算机计算溢出，因而需进行时间单位的规格化，在 GPS 数据处理中引进一个相对的规格化的时间单位。取观测区段的开始时刻为 −1，结束时刻为 +1，所对应的实际时刻为 t_1 和 t_m，则介于 t_1、t_m 之间的任意时刻 t_i 的定义值为：

$$T_i = \frac{2t_i - (t_1 + t_m)}{t_m - t_1} \tag{8.2}$$

引进相对时间后要注意轨道拟合与其后的轨道计算所用参数和定义区间的一致性。同时当 T_i 的绝对值大于 1，即越出其定义区间[−1,1]时，利用多项式(8.1)计算卫星位置，可能导致严重的外推误差，所以不应将标准化方程用于外推卫星位置。

需要指出的是，多项式拟合时引进了规格化的时间，在实际轨道计算时也应使用规格化的时间。

(2)卫星时钟多项式的拟合和标准化

与星历参数和轨道方程标准化相类似的问题，也出现在卫星时钟参数上。由于卫星时钟改正数也来自每小时更新一次的广播星历，所以当观测时段跨越一个或若干个世界时整点时，每一颗卫星将有两组或两组以上的星钟改正数。在数据处理中，要求我们提供整个观测时段内被测卫星连续、唯一且充分平滑的时钟改正多项式。

对卫星时钟进行时间改正有两个目的：一是确定真正的信号发射时间以便计算该时刻的卫星轨道位置；二是将各测站对各卫星的时间基准统一起来以估算它们之间的相对钟差。前一目的因卫星运动速度不足 4km/s，当时间改正达 ±0.25μs 时，位置改正已不足 ±1mm，因而十分容易满足；后一目的则要求时间多项拟合的数学精度优于 ±0.2ns，以便精确探测整周跳变，估算整周模糊度。

设 t_s 为卫星电文发射时的时间，其对应的 GPS 标准时间为 t，Δt_s 为卫星钟差改正数，其多项式表达形式为：

$$\Delta t_s = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \tag{8.3}$$

由多个参考历元的卫星钟差，利用最小二乘法原理求定多项式系数 a_i，再由式(8.3)计算任一时刻的钟差。因为 GPS 时间定义区间为一个星期，即 604800 秒，故当 $t - t_0 > 302400$（t_0 属于下一 GPS 周）时 t 应减去 604800，$t - t_0 < 302400$（t_0 属于上一 GPS 周）时 t 应加上 604800。

(3)初始整周模糊度的预估和整周跳变的发现与修复

确定整周模糊度的初值以作为平差时整周模糊度的近似值。大多数采用伪距观测值估算整周模糊度的初值。

由于各种原因造成接收机载波相位测量的暂时中断，从中断到重新锁定信号继续测量开始这段时间内，接收机中的计数器停止计数，因而使得中断后的相位观测值与未失锁情况下的相位观测值相差一个整数，此现象为整周跳变。必须发现并对存在整周跳变的观测值加以改正，否则将会严重影响成果质量和精度。一般要求纠正 ±0.5 周以上的整周跳变。

(4)观测值文件的标准化

各种接收机提供的记录数据项彼此不相同，同一数据项也可能互相有一些出入。例如观测时刻这个记录项，可能采用接收参考历元的值也可能是经过改正归算至 GPS 时间系统的值；又如相位观测值可能以周为单位，也可能以半周为单位，这就给后继数据处理带来极大的不便。为了保证后继工作的顺利进行，对进入平差的观测值文件必须进行规格化、标准化。

观测值文件标准化包括以下内容：

①记录格式标准化。经数据解码分流等处理后，提供的观测值文件是不必因接收机类型差异而再另作处理的"净化"数据。记录格式标准化意味着所有 GPS 预处理输出文件都采用相同的存取方式、记录类型，同类型记录有相同的长度。

②记录类型标准化。文件是由记录组成的。标准化文件对文件中的类型数量、类型代码以及每一种类型的记录都是确定的。

③记录项目标准化。每种类型的记录中含有的数据项也是确定的，各数据项的格式也是确定的。如果某数据项不存在或暂缺，则应以某种特定数据如"0"或空格填上，并有标志加以说明。

④采样密度标准化。不同类接收机甚至同类接收机采样间隔可能不同，标准化后应将数据采样间隔统一成一标准长度。这一标准长度应满足两个条件：一是最大间隔原则，即标准长度应大于或等于外业采样间隔最长的标准值；二是公倍数原则，即标准长度是任一测站任一接收机采样间隔的整数倍。采样密度标准化后，数据量将成倍地减少，故也称为数据压缩。数据

压缩工作应在周跳修复完成后进行。数据压缩后应等价于被压缩区间内的全部数据，且保持各压缩数据间的误差独立。在 GPS 观测数据压缩中常用多项式拟合法。

⑤数据单位标准化。数据文件中各数据都有量纲和单位，同一数据项的量纲和单位应当统一。例如载波相位观测值统一以周为单位。

目前 GPS 观层值文件标准化尚无公认的方案，因而任何处理软件应提供详细的有关数据文件的技术标准，遵守这些标准，用户才能进行正常的处理工作并获得可靠的结果。

8.1.3 基线向量解算和网平差计算

经过预处理后，观测值作了必要的修正，成为“净化”的数据，并提供了卫星轨道、时钟参数的标准表达式，估算了整周模糊度初值，就可以对这些载波相位观测值进行各种线性组合，以其双差值作为观测值列出误差方程，组成法方程，进行基线的平差解算。平差解算中一般以点间的坐标差作为平差未知数，故称为 GPS 基线解算，一般由接收机的随机软件完成。具体内容详见 8.2 节。

GPS 相位观测值经过基线解算，获得了各点间的基线向量成果。由于 GPS 成果属于 WGS—84 坐标系，因而就必须将它们转换至实用的国家或地方坐标系内，这是通过与地面网成果的综合处理来解决的。常用的方法是进行 GPS 网的约束平差和 GPS 网与地面网的联合平差。这部分内容详见 8.3 节。

8.2 GPS 基线向量的解算

根据 GPS 定位的基本原理，GPS 定位可以采用绝对定位和相对定位两种。绝对定位采用单站接收机的相位观测值（多以码相位观测值，即伪距）来求得测站的坐标，目前 C/A 码绝对定位精度约在 5～30m 之间，因而常用于导航，也可作为 GPS 相对定位的起算坐标。相对定位则利用多台接收机载波的相位观测值，对这些相位观测值进行各种线性组合，以求其差值作为观测值求得测站间的相对位置，相对定位精度对较短距离则在几厘米左右，较长距离（20km 以上）可达 1～2ppm，超长距离（几百～几千公里）则可高达 0.1～0.01ppm，因而在测量领域总是采用相对定位方法。

用相对定位方法确定的测站间相对位置关系可以用某一坐标系统下的三维直角坐标差（ΔX_{ij}，ΔY_{ij}，ΔZ_{ij}）表示，也可以用大地坐标差（ΔB_{ij}，ΔL_{ij}，ΔH_{ij}）表示。我们将这种点间的相对位置量称为基线向量坐标，对应于两点间的长度称为基线长度。本节将讨论如何利用载波相位观测值求解基线向量问题。

8.2.1 基线向量解算的差分模型

任一时刻载波相位观测值为该时刻接收机产生的参考频率信号的相位与接收到的来自卫星的载波信号的相位之差。假设安置在基线端点（i,j）的接收机，对 GPS 卫星 p 和 q 于时刻 t_1 和 t_2 进行了同步观测，则可得到 8 个独立的载波相位观测量，在静态相对定位中，普遍应用的是这些独立观测量的多种差分形式。

图 8.2 为相对定位中的求差示意图。假设这 8 个观测量分别为 $\varphi_i^p(t_1)$，$\varphi_i^p(t_2)$，$\varphi_i^q(t_1)$，$\varphi_i^q(t_2)$，$\varphi_j^p(t_1)$，$\varphi_j^p(t_2)$，$\varphi_j^q(t_1)$，$\varphi_j^q(t_2)$，若取符号 $\Delta\varphi^p(t)$，$\nabla\varphi_i(t)$，$\delta\varphi_i^p(t)$分别表示不同接收

机之间(即测站之间),卫星之间和不同时刻之间的观测量之差,则有:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\varphi^{p}(t) &= \varphi_j^{p}(t) - \varphi_i^{p}(t)\\ \nabla\varphi_i(t) &= \varphi_i^{q}(t) - \varphi_i^{p}(t)\\ \delta\varphi_i^{p}(t) &= \varphi_i^{p}(t_2) - \varphi_i^{p}(t_1)\end{aligned}\right\} \quad (8.4)$$

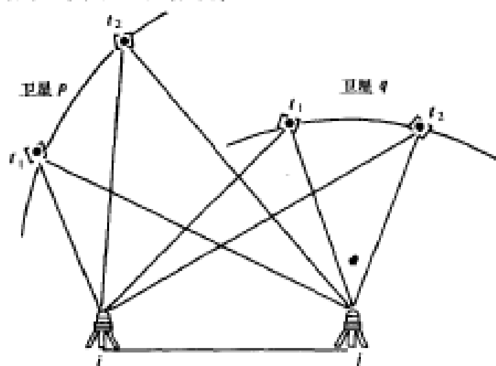


图8.2 相对定位中的求差示意图

在上式简单线性组合的基础之上,还可以进一步导出其它的线性组合形式。考虑到GPS定位时的误差源,实际上广为采用的组合形式只有三种,即单差、双差和三差。

单差:即不同接收机(也称不同测站)同步观测相同卫星所得观测量之差,单差又称求一次差,是相对定位中观测量的最基本线性组合形式。其表达形式为:

$$\Delta\varphi^{p}(t) = \varphi_j^{p}(t) - \varphi_i^{p}(t) \tag{8.5}$$

双差:即不同接收机同步观测一组卫星所得单差之差,又称求二次差。若应用上述符号则可表示为:

$$\nabla\Delta\varphi(t) = \Delta\varphi^{q}(t) - \Delta\varphi^{p}(t) = \varphi_j^{q}(t) - \varphi_i^{q}(t) - \varphi_j^{p}(t) + \varphi_i^{p}(t) \tag{8.6}$$

三差:即在不同时刻同步观测同一组卫星所得观测量的双差之差,又称求三次差。其表达式为:

$$\begin{aligned}\delta\nabla\Delta\varphi(t) = \nabla\Delta\varphi^{q}(t_2) - \nabla\Delta\varphi_i^{p}(t_1) &= [\varphi_j^{q}(t_2) - \varphi_i^{q}(t_2) - \varphi_j^{p}(t_2) + \varphi_i^{p}(t_2)]\\ &\quad - [\varphi_j^{q}(t_1) - \varphi_i^{q}(t_1) - \varphi_j^{p}(t_1) + \varphi_i^{p}(t_1)]\end{aligned} \tag{8.7}$$

建立差分模型的目的在于消除或减弱一些具有系统性误差的影响,如卫星轨道误差、卫星和接收机钟差以及大气折射误差等,减少平差计算中未知数的数量,因而是GPS测量中广泛采用的平差模型。特别是站星二次差分模型更是目前大多数GPS基线向量处理软件包中必选的模型。

差分模型适用于相对定位技术。但也应当看到,差分模型也存在一些值得重视的缺点,例如:首先,原始的独立观测量通过求差将引起差分量之间的相关性,这种相关性在平差计算中不应忽视;其次,在平差计算中,差分法将使观测方程的数目明显减少;其三,在一个时间段的观测中,为了组成观测量的差分,通常应选择一个参考观测站和一颗参考卫星,如果于某一历元对参考站或参考卫星的观测量无法采用,则将使观测量的差分产生困难。参加观测的接收机数量越多,情况将越为复杂。这时将不可避免地损失一些观测数据。因此,目前应用非差分模型进行高精度相对定位的研究已日益受到重视。

8.2.2 双差法基线向量解算

以站星二次差分观测值作为平差解算时的观测量,以测站间的基线向量坐标 $b=(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为主要未知量,建立误差方程,组成法方程进行求解,这就是双差法基线向量的解算。

(1)误差方程

站星二次差分的观测方程为：

$$\nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq}(t_i) = -\frac{f_s^p}{C}(\rho_i^p-\rho_j^p-\Delta_i^p+\Delta_j^p)+\frac{f_s^q}{C}(\rho_i^q-\rho_j^q-\Delta_i^q+\Delta_j^q)$$
$$+(\gamma_i^p-\gamma_j^p-\gamma_i^q+\gamma_j^q)+(\varepsilon_i^p-\varepsilon_j^p-\varepsilon_i^q+\varepsilon_j^q) \tag{8.8}$$

式中：f——GPS 信号频率；

C——信号传播速度；

ρ——站星距；

Δ——折射延迟改正；

ε 项——信号的测量误差；

γ 项——只与卫星和接收机有关的项，例如载波相位的初始整周模糊度等。

假定 γ 项中只含初始整周模糊度 N，则可令：

$$N_{ij}^{pq}=N_i^p-N_j^p-N_i^q+N_j^q \tag{8.9}$$

并令

$$\varepsilon_{ij}^{pq}=\varepsilon_i^p-\varepsilon_j^p-\varepsilon_i^q+\varepsilon_j^q \tag{8.10}$$

于是式(8.8)写成：

$$\nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq}(t_i) = -\frac{f_s^p}{C}(\rho_i^p-\rho_j^p-\Delta_i^p+\Delta_j^p)+\frac{f_s^q}{C}(\rho_i^q-\rho_j^q-\Delta_i^q+\Delta_j^q)+N_{ij}^{pq}+\varepsilon_{ij}^{pq} \tag{8.11}$$

为了解算出基线向量坐标(ΔX_{ij},ΔY_{ij},ΔZ_{ij})，必须对式(8.11)进行线性化，并引入(ΔX_{ij},ΔY_{ij},ΔZ_{ij})这三个量作为未知数。为解算需要，还需设定基线的某一端点为已知点，此处假定 i 点为已知点。

图 8.3 所示，令接收机至卫星方向的单位向量为 u，则有 u_i^p、u_i^q、u_j^p、u_j^q。

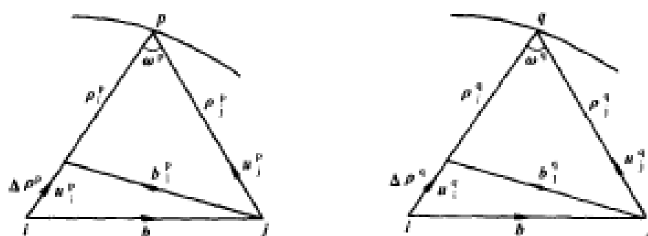


图 8.3　基线向量 b 与站星距 ρ 之间的关系

令

$$\left.\begin{aligned}&\left.\begin{aligned}\Delta u^p &= u_i^p-u_j^p\\ \Delta u^q &= u_i^q-u_j^q\end{aligned}\right\}\\ &\left.\begin{aligned}u_m^p &= \frac{1}{2}(u_i^p+u_j^p)\\ u_m^q &= \frac{1}{2}(u_i^q+u_j^q)\end{aligned}\right\}\end{aligned}\right\} \tag{8.12}$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta\rho^p &= \rho_i^p-\rho_j^p\\ \Delta\rho^q &= \rho_i^q-\rho_j^q\end{aligned}\right\} \tag{8.13}$$

则可得

$$\left.\begin{aligned} b_1^p &= -\rho_j^p \cdot \Delta u^p \\ b_1^q &= -\rho_j^q \cdot \Delta u^q \end{aligned}\right\} \tag{8.14}$$

于是有

$$b + b_1^p = \Delta\rho^p \cdot \Delta u_i^p$$

即

$$b - \rho_j^p \cdot \Delta u^p = \Delta\rho^p \cdot \Delta u_i^p \tag{8.15}$$

同样对卫星 q 有

$$b - \rho_j^q \cdot \Delta u^q = \Delta\rho^q \cdot \Delta u_i^q \tag{8.16}$$

对式(8.15)两边同乘以 u_m^q 取点积

$$u_m^p \cdot b - \rho_j^p \cdot (u_m^p \cdot \Delta u^p) = \Delta\rho^p \cdot (u_m^p \cdot u_i^p) \tag{8.17}$$

因为

$$\begin{aligned} u_m^p \cdot \Delta u^p &= \frac{1}{2}(u_i^p + u_j^p)(u_i^p - u_j^p) \\ &= \frac{1}{2}(u_i^p \cdot u_i^p + u_j^p \cdot u_i^p - u_i^p \cdot u_j^p - u_j^p \cdot u_j^p) \\ &= \frac{1}{2}(1-1) = 0 \end{aligned}$$

并考虑到

$$\cos\omega^p = u_i^p \cdot u_j^p = u_j^p \cdot u_i^p \tag{8.18}$$

$$\begin{aligned} u_m^p \cdot u_i^p &= \frac{1}{2}(u_i^p + u_j^p) \cdot u_i^p \\ &= \frac{1}{2}(u_i^p \cdot u_i^p + u_j^p \cdot u_i^p) \\ &= \frac{1}{2}(1 + \cos\omega^p) \\ &= \cos^2\frac{\omega^p}{2} \end{aligned} \tag{8.19}$$

于是式(8.15)变成

$$u_m^p \cdot b = -\cos^2\frac{\omega^p}{2}\Delta\rho^p \tag{8.20}$$

同样对卫星 q 有

$$u_m^q \cdot b = -\cos^2\frac{\omega^q}{2}\Delta\rho^q \tag{8.21}$$

将式(8.20)和式(8.21)改写成

$$\Delta\rho^p = -\sec^2\frac{\omega^p}{2} \cdot u_m^p \cdot b \tag{8.22}$$

$$\Delta\rho^q = -\sec^2\frac{\omega^q}{2} \cdot u_m^q \cdot b \tag{8.23}$$

将式(8.22)和式(8.23)代入式(8.11)得站星双差相位观测方程为

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq}(t_i) = &\left(\frac{f_s^p}{C}\sec^2\frac{\omega^p}{2} \cdot u_m^p - \frac{f_s^p}{C}\sec^2\frac{\omega^q}{2} \cdot u_m^q\right) \cdot b \\ &+ \frac{f_s^p}{C}(\Delta_i^p - \Delta_j^p) - \frac{f_s^p}{C}(\Delta_i^q - \Delta_j^q) + N_{ij}^{pq} + \varepsilon_{ij}^{pq} \end{aligned} \tag{8.24}$$

令 $-\varepsilon_{ij}^{pq} = V_{ij}^{pq}(t)$，相应的误差方程为

$$V_{ij}^{pq}(t_i) = \left(\frac{f_s^p}{C}\sec^2\frac{\omega^p}{2} \cdot u_m^p - \frac{f_s^p}{C}\sec^2\frac{\omega^q}{2} \cdot u_m^q\right) \cdot b$$

$$+\frac{f_s^p}{C}(\Delta_i^p-\Delta_j^p)-\frac{f_s^q}{C}(\Delta_i^q-\Delta_j^q)+N_{ij}^{pq}-\nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq}(t_i) \tag{8.25}$$

上式为向量形式的误差方程,应化成纯量形式。顾及

$$\left.\begin{aligned}
u_i^p&=\frac{1}{\rho_i^p}[\Delta X_i^p,\Delta Y_i^p,\Delta Z_i^p]^T\\
u_i^q&=\frac{1}{\rho_i^q}[\Delta X_i^q,\Delta Y_i^q,\Delta Z_i^q]^T\\
u_j^p&=\frac{1}{\rho_j^p}[\Delta X_j^p,\Delta Y_j^p,\Delta Z_j^p]^T\\
u_j^q&=\frac{1}{\rho_j^q}[\Delta X_j^q,\Delta Y_j^q,\Delta Z_j^q]^T\\
b&=[\Delta X_{ij},\Delta Y_{ij},\Delta Z_{ij}]^T
\end{aligned}\right\} \tag{8.26}$$

式中:$\Delta X_i^p=X^p-X_i$,上标 p 表示卫星,下标 i 表示测站,余类推。

则有如下站星双差观测值的误差方程

$$V_{ij}^{pq}=a_{ij}^{pq}\Delta X_{ij}+b_{ij}^{pq}\Delta Y_{ij}+c_{ij}^{pq}\Delta Z_{ij}+\Delta_{ij}^{pq}+N_{ij}^{pq}-\nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq}(t_i) \tag{8.27}$$

式中

$$\left.\begin{aligned}
a_{ij}^{pq}&=\frac{1}{2}S^p\left(\frac{\Delta X_i^p}{\rho_i^p}+\frac{\Delta X_j^p}{\rho_j^p}\right)-\frac{1}{2}S^q\left(\frac{\Delta X_i^q}{\rho_i^q}+\frac{\Delta X_j^q}{\rho_j^q}\right)\\
b_{ij}^{pq}&=\frac{1}{2}S^p\left(\frac{\Delta Y_i^p}{\rho_i^p}+\frac{\Delta Y_j^p}{\rho_j^p}\right)-\frac{1}{2}S^q\left(\frac{\Delta Y_i^q}{\rho_i^q}+\frac{\Delta Y_j^q}{\rho_j^q}\right)\\
c_{ij}^{pq}&=\frac{1}{2}S^p\left(\frac{\Delta Z_i^p}{\rho_i^p}+\frac{\Delta Z_j^p}{\rho_j^p}\right)-\frac{1}{2}S^q\left(\frac{\Delta Z_i^q}{\rho_i^q}+\frac{\Delta Z_j^q}{\rho_j^q}\right)
\end{aligned}\right\} \tag{8.28}$$

$$\left.\begin{aligned}
S^p&=\frac{f_s^p}{C}\cdot\sec^2\frac{\omega^p}{2}\\
S^q&=\frac{f_s^q}{C}\cdot\sec^2\frac{\omega^q}{2}
\end{aligned}\right\} \tag{8.29}$$

$$\Delta_{ij}^{pq}=\frac{f_s^p}{C}(\Delta_i^p-\Delta_j^p)-\frac{f_s^q}{C}(\Delta_i^q-\Delta_j^q) \tag{8.30}$$

当基线长度小于 40km 时,式(8.29)中的 $\sec^2(\omega^q/2)$ 与 1 之差小于 1ppm,不影响广播星历定位可能达到的精度,故可将 $\sec^2(\omega^q/2)$ 以 1 代替;考虑到 f_s^p 与 f_s^q 之差小于 1ppm,故 f_s^p 可用标称频率 f_s 代替,因而有

$$S^p=S^q=\frac{f_s}{C} \tag{8.31}$$

设基线向量 b 的近似值和初始整周模糊度 N_{ij}^{pq} 的近似值分别为 $(\Delta X_{ij}^0,\Delta Y_{ij}^0,\Delta Z_{ij}^0)^T$ 和 $(N_{ij}^{pq})_0$,它们的改正数分别为 $(\delta X_{ij},\delta Y_{ij},\delta Z_{ij})^T$ 和 δN_{ij}^{pq},则误差方程的最终表达式为:

$$V_{ij}^{pq}=a_{ij}^{pq}\delta X_{ij}+b_{ij}^{pq}\delta Y_{ij}+c_{ij}^{pq}\delta Z_{ij}+\delta N_{ij}^{pq}+W_{ij}^{pq} \tag{8.32}$$

式中

$$a_{ij}^{pq}=\frac{1}{2}\frac{f_s}{C}\left(\frac{\Delta X_i^p}{\rho_i^p}+\frac{\Delta X_j^p}{\rho_j^p}-\frac{\Delta X_i^q}{\rho_i^q}-\frac{\Delta X_j^q}{\rho_j^q}\right)$$

$$b_{ij}^{pq}=\frac{1}{2}\frac{f_s}{C}\left(\frac{\Delta Y_i^p}{\rho_i^p}+\frac{\Delta Y_j^p}{\rho_j^p}-\frac{\Delta Y_i^q}{\rho_i^q}-\frac{\Delta Y_j^q}{\rho_j^q}\right)$$

$$c_{ij}^{pq} = \frac{1}{2}\frac{f_s}{C}\left(\frac{\Delta Z_i^p}{\rho_i^p} + \frac{\Delta Z_j^p}{\rho_j^p} - \frac{\Delta Z_i^q}{\rho_i^q} - \frac{\Delta Z_j^q}{\rho_j^q}\right) \tag{8.33}$$

$$W_{ij}^{pq} = a_{ij}^{pq}\Delta X_{ij}^0 + b_{ij}^{pq}\Delta Y_{ij}^0 + c_{ij}^{pq}\Delta Z_{ij}^0 + (N_{ij}^{pq})_0 + \Delta_{ij}^{pq} - \nabla\Delta\varphi_{ij}^{pq}(t_i) \tag{8.34}$$

(2)法方程的组成及解算

式(8.32)为测站(接收机)i、j 和卫星 p、q 在任一历元 t_i 的双差观测值误差方程。当 t_i 历元在测站 i、j 上同时观测了 S 个卫星，则可列出$(S-1)$个误差方程，相应要引入$(S-1)$个初始整周模糊度未知数，即 t_i 历元共有$(S-1)+3$ 个未知数。若测站 i、j 对所有 S 个卫星进行了连续观测，则总共有 $m=n(S-1)$个误差方程，其中 n 为观测历元个数。将所有误差方程写成矩阵形式有：

$$V = AX + L \tag{8.35}$$

其中：

$$\begin{cases} V = (V_1, V_2, \cdots\cdots, V_m)^{\mathrm{T}} \\ X = (\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta N_1, \delta N_2, \cdots\cdots, \delta N_{S-1})^{\mathrm{T}} \\ L = (W_1, W_2, \cdots\cdots, W_m)^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{8.36}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{j1} & a_{j2} & a_{j3} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{j+1,1} & a_{j+1,2} & a_{j+1,3} & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ a_{j+2,1} & a_{j+2,2} & a_{j+2,3} & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{2j,1} & a_{2j,2} & a_{2j,3} & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m-j,1} & a_{m-j,2} & a_{m-j,3} & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m-1,1} & a_{m-1,2} & a_{m-1,3} & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ a_{m,1} & a_{m,2} & a_{m,3} & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{8.37}$$

$$j = \frac{m}{S-1}(\text{即观测历元数 } n)$$

设各类双差观测值等权且彼此独立，即权阵 P 为单位阵，因而可组成法方程：

$$NX + B = 0 \tag{8.38}$$

式中：$N = A^{\mathrm{T}}A$，$B = A^{\mathrm{T}}L$。

于是可解得 X 为：

$$X = -N^{-1}B = -(A^{\mathrm{T}}A)^{-1}(A^{\mathrm{T}}L) \tag{8.39}$$

若 i 点坐标 X_i，Y_i，Z_i 已知，则可求得 j 点坐标为：

$$\left.\begin{aligned} X_j &= X_i + \Delta X_{ij}^0 + \delta X_{ij} \\ Y_j &= Y_i + \Delta Y_{ij}^0 + \delta Y_{ij} \\ Z_j &= Z_i + \Delta Z_{ij}^0 + \delta Z_{ij} \end{aligned}\right\} \tag{8.40}$$

基线向量坐标平差值为：

$$\left.\begin{aligned} \Delta X_{ij} &= \Delta X_{ij}^0 + \delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} &= \Delta Y_{ij}^0 + \delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} &= \Delta Z_{ij}^0 + \delta Z_{ij} \end{aligned}\right\} \tag{8.41}$$

基线长度平差值为：

$$b = \sqrt{\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2 + \Delta Z_{ij}^2} \tag{8.42}$$

整周模糊度平差值为：

$$N_i = N_i^0 + \delta N_i \qquad (i = 1,2,\cdots,S-1) \tag{8.43}$$

(3)精度评定

1)单位权中误差估值

单位权中误差估值 m_0 由下式算得：

$$m_0 = \sqrt{\frac{V^{\mathrm{T}}PV}{m-S-2}} = \sqrt{\frac{V^{\mathrm{T}}V}{m-S-2}} \tag{8.44}$$

式中 $V^{\mathrm{T}}V$ 中的 V 可将按式(8.39)求出的 X 代入式(8.35)求得。此外，$V^{\mathrm{T}}V$ 也可由下式算得：

$$V^{\mathrm{T}}V = L^{\mathrm{T}}L + B^{\mathrm{T}}X$$

2)平差值的精度估计

未知数向量 X 中任一分量的精度估值为：

$$m_{x_i} = m_0\sqrt{\frac{1}{P_{x_i}}} \qquad (i = 1,2,\cdots,t;t = S+2) \tag{8.45}$$

式中 P_{X_i} 为未知数 X_i 的权，可直接由 N^{-1} 中的对角元素求得。设：

$$N^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{x_1x_1} & Q_{x_1x_2} & & Q_{x_1x_t} \\ Q_{x_2x_1} & Q_{x_2x_2} & & Q_{x_2x_t} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Q_{x_tx_1} & Q_{x_tx_2} & & Q_{x_tx_t} \end{bmatrix} \tag{8.46}$$

则：

$$P_{x_i} = \sqrt{\frac{1}{Q_{x_ix_i}}}$$

于是：

$$m_{x_i} = m_0\sqrt{Q_{x_ix_i}} \tag{8.47}$$

3)基线长度 b 的精度估值

已知：$$b = \sqrt{(\Delta X_{ij}^0 + \delta X_{ij})^2 + (\Delta Y_{ij}^0 + \delta Y_{ij})^2 + (\Delta Z_{ij}^0 + \delta Z_{ij})^2}$$

在 X、Y、Z 处展开有：

$$b = b_0 + \frac{\Delta X_{ij}^0}{b_0}\delta X_{ij} + \frac{\Delta Y_{ij}^0}{b_0}\delta Y_{ij} + \frac{\Delta Z_{ij}^0}{b_0}\delta Z_{ij} \tag{8.48}$$

式中：$$b_0 = \sqrt{(\Delta X_{ij}^0)^2 + (\Delta Y_{ij}^0)^2 + (\Delta Z_{ij}^0)^2}$$

将式(8.48)写成：

$$\delta b = f^{T}\Delta X \tag{8.49}$$

$$\left.\begin{aligned} f &= \left(\frac{\Delta X_{ij}^{0}}{b_0}, \frac{\Delta Y_{ij}^{0}}{b_0}, \frac{\Delta Z_{ij}^{0}}{b_0}, \right)^{T} \\ \Delta X &= (\delta X_{ij}, \delta Y_{ij}, \delta Z_{ij})^{T} \end{aligned}\right\} \tag{8.50}$$

ΔX 的协因数阵可由 N^{-1}中取出，即：

$$Q_{\Delta x} = \begin{bmatrix} Q_{\delta X_{ij}} & Q_{\delta X_{ij}\delta Y_{ij}} & Q_{\delta X_{ij}\delta Z_{ij}} \\ Q_{\delta Y_{ij}\delta Y_{ij}} & Q_{\delta Y_{ij}} & Q_{\delta Y_{ij}\delta Z_{ij}} \\ Q_{\delta Z_{ij}\delta Y_{ij}} & Q_{\delta Z_{ij}\delta Y_{ij}} & Q_{\delta Z_{ij}} \end{bmatrix} \tag{8.51}$$

于是：

$$Q_{\delta b} = f^{T} Q_{\Delta X} f \tag{8.52}$$

而 b 的中误差估值为：

$$m_b = m_0\sqrt{Q_{\delta b}} \tag{8.53}$$

基线长度相对中误差估值为：

$$m_r = \frac{m_b}{b}10^6 \quad (\text{ppm}) \tag{8.54}$$

8.2.3 基线处理软件 SKI 简介

GPS 测量外业观测过程中，必须每天将观测数据输入到计算机中，并计算 GPS 基线向量，以便及时进行外业观测数据质量的检核。这一计算工作通常是利用仪器厂家提供的随机软件完成，也可以用国内研制的软件完成。

我国现引进的测地型 GPS 接收机多为 Trimble、Ashtech、Leica 和 SOKKIA 等系列接收机，相应于这些接收机各有自己的 GPS 数据处理软件包，例如 Trimble 接收机对应的 Trimvec 软件包，Ashtech 对应 GPPS 软件包，Leica 对应 SKI 软件包，SOKKIA 对应的 GSP1A 软件包等，这些软件使用方法大致相同，操作也比较方便，正常情况下均可达到标称精度，还具有较为丰富的人工干预措施，使有经验的用户可以精化处理某些不太满意的结果。本节以瑞士徕卡仪器公司 Wild200/300 系列接收机基线处理软件 SKI2.33 版为例，介绍该软件的主要功能模块以及基线处理的基本作业流程。

(1)SKI 软件的功能模块

SKI(Static Kinematic Software)是徕卡公司研制的 GPS 后处理软件系统。

其主要功能模块包括：系统设置、测量作业计划编制、项目管理、输入输出管理、多基线平差处理，数据调阅及编辑等。该软件包还有坐标变换与地图投影、数据标准化交换格式两项选件。其主要功能见表 8.1。

SKI 软件的主要功能模块　　　表 8.1

模 块 名	主 要 功 能
Configuation 系统设置	输入输出单位的设置 打印表头等用户设置
Preparation 测量准备工作	输入、修改、删除测站信息；进行卫星可见性预报、显示打印相应图表，便于卫星有利观测时段的选择
Project 项目管理	进行项目数据管理(建立、打开、复制、移动、删除)；项目数据的更新；项目标题、时区以及有关限值的设定
Import 输入输出管理	数据文件的传输和管理、数据备份制作、生成 RINEX 格式；将数据分配给指定项目

续上表

模块名	主要功能
Data Processing 基线数据处理	WGS—84系统基线平差处理，支持各种作业模式的观测数据数据选择（工作区选择和解算参数选择）；多基线平差处理（单点定位、基线双差解算、残差计算）；成果存储
View/Edit 数据调阅 数据编辑	图解及数值形式调阅并修改指定项目的数据（点号、点名等说明注记、天线高、初始坐标等）；显示已解算基线的点位误差；显示图形闭合差；放大和打印网图
Datum/Map 坐标变换与地图投影选件	进行坐标变换和地图投影计算（内含点位坐标集合、常用椭球、投影系统、转换参数库）
Adjustment 网平差选件	进行GPS网的平差

(2)SKI软件基线处理的基本流程

SKI软件进行基线处理的思路，主要包括图8.4几个部分：

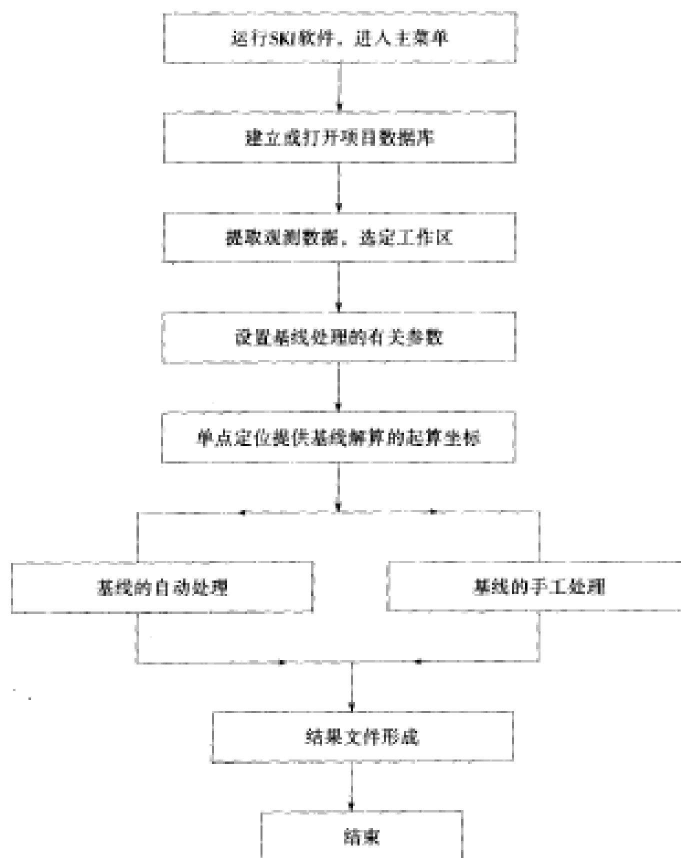


图8.4 SKI基线处理软件的基本流程图

1)建立新的项目数据库

SKI 软件运行后,首先应结合所进行的测量工程项目建立相应的项目数据库,以避免不同项目的数据相互混淆。操作时要求在 path 项中输入新建库所在的盘号和目录名,Name 项中输入项目数据库名称,作为今后使用和输出时的标识,一般以项目取名,便于记忆和区别。

2)提取并分配观测数据

观测数据一般包括相位观测数据文件和卫星星历数据文件以及测站信息。它的提取有四种方式:控制器输入、读卡机输入、备份文件输入以及 RINEX 格式输入。这些读入内存的数据还需要分配到相应的项目数据库中,为基线的处理作好准备。

3)设置基线解算的参数

为了基线解算的方便,软件针对一般条件下的解算需要,设置了解算参数的缺省值,在手工处理时,为了满足一些特殊的需要,可以对一些解算参数进行修改设置。可修改的参数主要有:

①Cut—off angle:卫星截止高度角;

②Tropospheric model:对流层改正模型;

③Ionospheric model:电离层改正模型;

④Ephemeris:采用星历(广播星历和精密星历)数据,如果选精密星历时,必须事先将观测期间的精密星历数据加入到项目库中,即输入精密星历所在的磁盘路径及文件名。

⑤Data use:选择采用哪类观测数据。有三种类型可选择,即:码、相位和码加相位;

⑥Frequency:选择采用哪个频率上的数据。有三种数据可供选择,即:L_1、L_2、L_1+L_2;

⑦Limitation:选择整周未知数解允许的最大基线长度,一般为 20km,即超过 20km 的基线将不解初始整周数。

⑧apriorirms:设置先验的单位权中误差。在基线解算时,如在确定初始整周未知数后,单位权中误差大于此值,则认为初始整周数解算不成功。

4)基线解算

完成上述各项准备工作后,就可选定工作区,定义计算模式,进行下列数据处理:

首先进行伪距单点定位。为了保证基线解算具有足够的精度,《GPS 测量规范》规定:进行 C 级及以下测量时,起算点的 WGS—84 地心坐标精度应不低于 25m,进行 B 级测量时,应不低于 3m。为此如果测区内有符合要求的已知点(如 A、B 级网点)更好,否则可选用软件本身提供的单点定位模式来解决。

正确且较为简便的方法是:在全网中选择一个设站时间较长的测站观测数据进单点定位,得到优于 20m 的起算坐标,将该坐标存入数据库。其它参考站的起算坐标可以通过基线向量的传递获得,这样可以保证全网采用统一的起算坐标。

其次进行多基线解算。在选定的工作区内,选择一个或一个以上的测站作为参考站,再选择一个或一个以上的测站作为流动站,参考站必须与流动站间有同步观测数据。凡在已选择参考站与流动站间有同步观测数据时,都将自动构成基线进行处理。一个流动站可以同时与多个已选择的参考站构成基线。每条基线选择了参考站和流动站后,即可选择 Compute 项,软件自动进行基线的解算。

5)输出结果文件

基线解算完毕可以选择 Result 项,查看基线解算结果。软件将列出已解算的基线坐标分量的中误差,及初始整周未知数是否解算成功的标志(Y 或 N);在 Log 文件里可查看基线更详

细的信息，如观测数据质量、测站信息及初始整周解算的可靠性分析、周跳和失锁记录信息等；选择 Store 可将基线结果存入数据库；选择 Residuals 可计算选定基线的残差；选择 File 可将基线解算结果作为可读的 ASCII 文件存盘输出。

基线向量解算结果文件可参见附录 B。

(3)RINEX 数据交换格式

不同厂家生产的接收机都定义了自己的数据存储格式，采用自己的基线处理软件，如果要用不同厂家的接收机进行相对定位或者用某厂的接收机随机软件来处理另一厂的接收机观测数据，就会出现一些麻烦。

解决这一问题的理想途径就是定义一种统一的与接收机无关的数据交换格式，即由 Bernie 大学天文研究所定义的 RINEX 文件格式，这一文件可以用自己开发的软件生成，也可以用接收机随机软件生成，或者用 Bernie 大学开发的专门用于各种类型接收机数据转换成 RINEX 文件的软件 PC RINEX 生成。

SKI 软件中 RINEX 文件功能模块是可选的，这个选项允许用户以 RINEX 格式输入数据，并用 SKI 软件处理数据。处理这一问题的一般思路是：

1)复制数据。将 RINEX 文件中数据传送到用户 PC 机临时目录之中，选择 RINEX 文件所位于的驱动器和目录，选择需传送的 RINEX 文件集，按[OK]键开始传输，RINEX 文件将被转换进徕卡数据集。

2)将数据分配给数据库。将数据集分配到已有的 SKI 项目之中，右面的框显示了当前所选的输入数据的项目，项目的缺省为最后打开的一个，如果需要还可以从列表中选择其它项目，同样也能够进行类似于从控制器传输的一切操作。

3)保存原始数据。如果想以原始的徕卡格式保存数据请按备份，如果想以 RINEX 格式保存数据请选择 RINEX。只需键入要保存数据的路径。

8.2.4 基线向量解算结果的分析

前面已经介绍了基线解算的双差分数学模型，在实际基线向量处理时，模型要比前面讨论的复杂得多。例如要顾及时段中信号间断引起的数据剔除问题；劣质观测数据的发现及剔除；星座变化引起的整周模糊度 N 的增加问题等。此外还应考虑如何进一步消除偏差影响。例如对天顶方向电离层模型参数和对流层改正数的残余误差进行估计校正，甚至对接收机时钟特征值也可以进行重新评估。因而 GPS 基线向量处理程序是一个非常庞大的软件包，其质量和处理的自动化程度成为广大用户十分关注的要点。

基线处理完成后应对其结果作以下分析：

(1)残差分析

平差处理时假定观测值仅存在偶然误差，当存在系统误差或粗差时，处理结果将有偏差。因此有必要对观测值残差分布情况进行分析。

理论上，载波相位观测精度为 1%(甚至 1‰)周，即对 L_1 波段信号观测误差只有 2mm(甚至 0.2mm)。因而当偶然误差达 1cm 时应认为观测值质量存在较严重的问题；当系统误差达分米级时应认为处理软件的模型不适用；当残差分布中出现突然的跳跃或尖峰时，则表明周跳处理未成功。

观测值残差分布不合理将体现在平差后的单位权中误差估值上，一般要求在 0.05 周以下(与距离长短有关)，否则表明观测值中尚存在某些问题，它们可能是下述原因引起的：

1)存在劣质(即低精度)观测值(通常受多路径干扰、外部无线电信号干扰、接收机时钟不稳定等因素);

2)观测值改正模型不适宜或差分处理后存在未被模型化的误差,应主要考察电离层和对流层改正模型的精度及适用性;

3)周跳未被完全修复而观测值中有粗差;

4)整周模糊度解算不成功使观测值存在系统误差。

某些商用随机软件可以用图或表的形式给出在一个时段内每颗非基准星与基准星之间双差观测值的残差。若每颗卫星的残差图形都始终稳定在纵坐标为零周附近,随时间变动而形成一条较平直的细带,则比较理想。若某颗非基准星的残差线起伏较大,则表明该非基星的单差可能有问题,可考虑删去该星;若所有的残差线都不好,很可能是基准星的问题,可改用另一颗卫星作为基准星。

(2)处理结果精度的自评

1)验后单位权方差检验

通过对验后单位权方差进行检验,看是否与理论值相近。检验未通过的原因通常有以下几个方面:其一,观测值的问题;其二,起算数据的问题。

2)基线长度的精度

要求处理后基线长度中误差在根据标称精度计算的精度值内。目前大多数商用软件的基线长度标称精度公式为(5 ~ 10mm + 1 ~ 2ppm·D)。

对于短基线(20km以内),单频数据通过差分处理可有效地消除电离层影响,从而确保相对定位结果的精度。当基线长度增长时,应使用双频接收机以有效地消除电离层的影响,尤其是在太阳活动高峰期,其结果将明显优于单频数据的处理结果。

3)双差固定解与双差实数解之间的差值

理论上整周模糊度是一整数,但平差解算得到的是一实数,由此而得的结果称为双差实数解。将实数(整周模糊度未知数)确定为整数,在进一步平差时不作为未知数求解,这样的结果称为双差固定解。

对于短基线(例如小于20km),当静态观测1h以上时,由于随时间而变化的一些系统性偏差,诸如电离层效应、多路径效应等将会大大地减弱;同时由于在较长的观测时间里,所观测卫星的几何分布的较大变动也会改善参数的确定精度,因而可以较精确的确定整周模糊度,其解算结果将优于实数解,但两者之间的基线向量坐标应符合良好(通常要求向量坐标差小于5cm)。当双差固定解与实数解的向量坐标差达到分米级时,则处理结果可能有问题,其原因多为观测值质量不佳。对于长基线来说,由于电离层折射误差、卫星轨道误差等的影响难以有效地消除,整周模糊度参数的求解精度往往很低,整数解向量优化搜索的方法往往失效,此时勉强取整对于相对定位精度有损无利,因而以双差浮动解为佳。

所有基线解算完毕后,要进一步评定其质量,还应当看环线坐标增量闭合差和全长相对闭合差,参见第7.5节介绍。

8.2.5 提高基线向量解算质量的方法

利用GPS随机商用软件进行基线向量解算,一般情况下,可以按照自动解算方法进行。有时也会遇到某个观测时段或某条基线自动解算结果的质量不理想的情况。其产生的原因是多方面的,既有可能是数据处理软件本身的不完善性,也有可能是所采集的数据质量欠佳。对

于后者，无疑得把有问题的数据剔除掉，甚至返工重测；而对于前者，就得寻找原因，寻求解决的办法。

目前，由于GPS数据处理技术仍处于研究、发展阶段，其中尚有若干问题未能圆满解决，因而，软件所采用的数据处理模型、方法及算法恰当与否，直接关系到成果质量。为此，各商用软件为了弥补自身在数据处理技术上的不足，相应开发出许多人工干预的功能，以供用户选择所用。用户应用这些功能，将有利于提高GPS基线解算结果的精度和质量。尤其是数据质量欠佳的基线，做些特殊处理常常可望达到理想的结果。人工干预的主要措施有：

(1)提高单点定位解的精度

由GPS定位原理可以知道，基线解算时必须固定一个点的坐标，该固定点坐标在WGS—84系中的精度，将会对基线解算结果的精度产生影响。表8.2列举了用GSP1A软件解算某条长约10.3km的基线，解算时人为地给固定点各坐标分量加入一误差，得到的基线向量差值情况。采用如下三种方案：

方案Ⅰ：$+3''(N、E)$、$+90m(H)$；

方案Ⅱ：$+1.5''(N、E)$、$+45m(H)$；

方案Ⅲ：$+0.5''(N、E)$、$+15m(H)$。

起算点不同精度对基线解算结果的影响 表8.2

方案	Δdx(mm)	Δdy(mm)	Δdz(mm)	ΔS(mm)	W(mm)	$\overline{W}$(ppm)
Ⅰ	−19.4	−42.9	+29.1	−33.7	55.3	2.68
Ⅱ	−10.6	−28.6	+14.8	−18.1	33.9	1.64
Ⅲ	−3.4	−7.9	+6.8	−6.1	11.0	0.53

表中：W——基线向量环全长闭合差；

$\overline{W}$——全长相对闭合差。

因此，要进行精密控制测量，固定点误差的影响是不容忽视的。根据现在的条件，要准确地获得一个点的WGS—84系的坐标还有困难，目前用C/A码伪距定位的精度约为20m，并且与观测时间的长短有关。为此，在尚未精确地获得地方坐标系与WGS—84系的转换参数的情况下，要提高固定点位置的精度，通常可采用以下做法：

①尽量采用已知的A级和B级网点坐标。我国已通过国家GPS联测和A级网会战，建立了高精度的GPS A级网，其点位坐标分量精度均在0.2m以内，另外国家B级网亦已完成数据处理，这些网点坐标要充分利用。

②选择测区中心部位的某点独立观测三次以上，每次观测时段大于2h，取多次伪距定位单点解的平均值作为全网基线解算的起算点，其它各点的坐标由此点递推而得。

(2)更换参考星和优选组星

商用软件对基线数据的自动解算，一般选择观测开始时段的某颗高度角较大的卫星作为参考星。可在观测时段内，有可能所选中的参考星是一颗正在降落或信噪比较大、数据质量欠佳的卫星。因此，对成果质量不理想的基线进行分析，应根据相位差分的残差曲线图及卫星高度角的变化来判断参考星的选择是否有问题。同时，影响基线结果质量的因素既有可能是纳入了数据质量不好的某颗或几颗卫星，也有可能是观测过程中出现过卫星失锁的现象。为此有必要采取人工干预的措施来进行处理。卫星的筛选要顾及卫星方位的分布及几何图形强度

因子GDOP值的变化，而不能盲目删除卫星，因为去掉一颗卫星就意味着卫星的方位分布合理性及GDOP值将发生变化。另外，也有可能是参考星及组星的综合影响。

下面是一个生产实践中的典型实例。用三台GSS1型单频接收机同步观测了一个如图8.5所示的闭合环，观测时间为1994年4月某天的13h16min~15h16min（地方时），数据采样间隔15s，高度角限值为15°，时段内GDOP值为3.2~7.2，卫星数较多，先后共有8颗星，其相应的卫星方位角和高度角随时间的变化见图8.6。22号星从开始至14h32min消失，15号星从14h06min、27号星从14h34min开始锁住，其它5颗星从始至终均锁住。

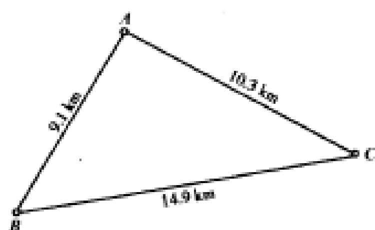


图8.5 同步观测闭合环示意图

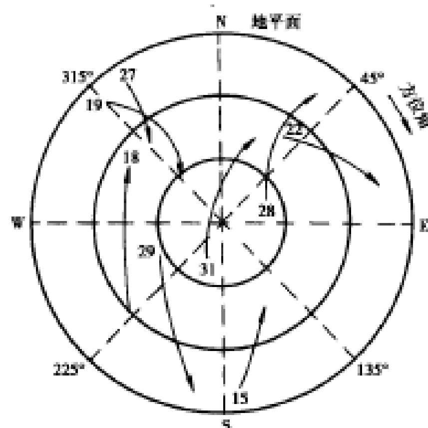


图8.6 观测时段内可见卫星分布图

基线自动解算时，成果质量不理想，三条基线解算时的残差曲线图均波动较大，且全长相对闭合差为7.83ppm，所选参考星为18号星。从图8.6可见，31号星在整个观测时段内高度角均较好，而18号星为一颗正在下降的星；22号星中途消失，27号星中途升起被观测的时间不算太长，15号星也为一颗中途升起的星，但观测时间有70分钟；从方位分布来看，仅90°~180°方向较差，只有15号星。为此，分别按以下四种方案进行分析，结果列于表8.3。

方案I：自动解算。参考星为18号，组星为22、29、31、28；

方案II：更换参考星。参考星为31号，组星为22、29、18、28；

方案III：优选组星。参考星为18号，组星为29、31、28、19、15号；

方案IV：综合方案II和方案III。参考星为31号，组星为29、18、28、19、15号。

不同方案同步环的解算结果　　表8.3

方案	$\sum dx$(m)	$\sum dy$(m)	$\sum dz$(m)	W(m)	$\overline{W}$(ppm)
I	-0.1701	-0.0394	0.2042	0.2687	7.83
II	-0.25259	-0.2173	-0.0703	0.3408	9.93
III	0.1450	-0.1918	0.0387	0.2435	7.10
IV	0.0020	-0.0081	0.0026	0.0087	0.25

从表可见，综合考虑更换参考星及组星，同步观测环成果的质量得到了显著改善。

(3)裁减观测时段

实际观测过程中，有可能受外界条件的干扰，影响天线对信号的接收，还有可能出现卫星失锁的现象。另外，作业员未按调度命令执行而提前开机和推迟关机，出现部分时段数据质量不好的情况。此时就有必要根据外业观测手簿的记录及自动解算结果提供的信息来作分析，对观测时段进行裁减，选取最佳数据时段。在裁减时段中须注意的一点是，确保有效的时段长度求解整周模糊度参数。

(4)固定模糊度参数方式的选择

不同类的商用软件求解整周模糊度参数的模型、算法均有差异，因而对基线数据解算结果

肯定会产生影响。为此，有些商用软件为用户提供了一些备选功能，如 GSP1A 软件，在双差固定解中，提供了两种固定模糊度的方法：Simult(同时固定)和 Sequent(顺序固定)。在双差浮动解中，求得的整周模糊度为一实数估值，对于短基线，其估值的精度肯定会高些，选用此两种方式固定模糊度差异不大；而对于长基线，由于误差的相关性减弱，许多误差消除不够彻底，估值的精度必定较差，因而，两种方式固定模糊值的结果必定有差异。表 8.4 列出了 5 条基线选用此两种固定方式解算时的结果差值。

两种固定模糊度方式解算时的结果差值 表 8.4

基 线	S(km)	Δdx(m)	Δdy(m)	Δdz(m)	ΔS(m)
1	0.57	0	0	0	0
2	0.71	-0.0001	0	0	0.0001
3	9.07	0.1467	-0.0303	0.0918	0.0949
4	10.33	0.1645	-0.0317	-0.0978	0.1408
5	14.92	0.0615	-0.0202	-0.1594	0.1156

从表 8.4 可见，两条短基线解算的效果均较好，差值甚微；而三条长基线差值较大，该项的影响是显著的。因此，实践中应加强检核，来考虑选择何种解算方式。

(5)大气延迟模型方式选择

大气延迟误差包括两项：一项是对流层延迟误差；另一项是电离层延迟误差。由于大气的变化非常复杂，通过地面观测的气象要素来进行数学模拟，一定会有偏差，现有的改正模型有多种，至于采用何种模型更切合实际，要因情况而定。如 SKI 软件为对流层延迟改正提供了五项选择：Saastsmoinen 模型，Hopfield 模型，Modifield 模型，EssenFroome 模型和 Notroposphere 模型。用户通常采用 Hopfield 模型。电离层延迟误差改正取决于双频与单频接收机，当今的研究表明，双频接收机改正的有效性可达 98% 以上，而单频接收机利用广播的电离层参数改正有效性较差，但不管怎样，还是进行这项改正为好。表 8.5 比较了一个单频接收机同步观测环进行电离层延迟改正与不改正的效果。

电离层延迟改正与否的结果 表 8.5

方式选择	$\sum S$(km)	$\sum dx$(m)	$\sum dy$(m)	$\sum dz$(m)	W(m)	$\overline{W}$(ppm)
改正	34.32	0.0010	-0.0049	0.0002	0.0050	0.15
不改正	34.32	0.0599	-0.0152	0.1603	0.1718	5.01

实际作业中，如果不测定大气气象元素，则软件按约定值进行大气延迟改正。实践表明，较长基线应实测气象元素。

(6)卫星高度角限值和观测值残差限值的设置

无论是外业采集数据还是内业基线向量解算，均可设置卫星高度角的限值，其目的是因为低高度角的卫星信号强度较弱，受大气影响较严重，数据质量较差。通常限值设置为 15 度，过高的限值会影响定位的几何图形强度。

基线数据解算时，为了免受粗差的影响，相位观测值的残差应在某一限值之内，若超出限值，则就怀疑此观测值有问题，应将其淘汰掉。一般用三倍中误差法(3Rms)作为限值标准。

综上所述，GPS 基线向量的解算，首先应按自动解算方式进行，如果观测条件较好，一般解算结果是令人满意的。对于自动解算结果不理想的基线，可以根据外业数据采集的实际情况，全面考察基线结果文件中提供的有关信息进行手工处理，一般情况下可以获得较好的效果，如

果仍不能满足要求，就必须进行外业返工。

8.3 GPS定位结果的坐标转换

我们知道，各种测量成果均对应于各自的坐标系。GPS定位结果属于WGS—84坐标系，而常规地面测量成果往往是属于国家大地坐标系，或是属于地方独立坐标系。为建立GPS定位结果与常规地面测量结果之间的关系，使两者之间在坐标、边长、方位上达到兼容一致，具有可比性，必须研究GPS定位结果与常规地面测量成果之间的坐标转换问题。本节首先介绍GPS定位结果的表示以及将GPS定位结果转换为国家或地方独立坐标系的方法，最后讨论几种转换方法的应用。

8.3.1 GPS定位结果的表示方法

WGS—84大地坐标系是GPS卫星定位系统常用的大地坐标系，因而利用GPS接收机进行测量的成果均属于WGS—84坐标系。

GPS定位通常有单点绝对定位和点间相对定位两种方法。单点定位确定的是点在WGS—84坐标系中的位置，既可以用大地坐标 B、L、H 表示，也可用三维直角坐标 X、Y、Z 表示。相对定位确定的是点之间的相对位置，同样既可以用大地坐标差 ΔB、ΔL、ΔH 表示，也可用三维直角坐标差 ΔX、ΔY、ΔZ 表示。相对定位时其中一个点为固定点，设为1号点，其坐标为 B_1、L_1、H_1 或 X_1、Y_1、Z_1，则另一个点(2号点)的三维直角坐标和大地坐标可分别求得：

$$\left.\begin{aligned}\begin{bmatrix}B_2\\L_2\\H_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}B_1\\L_1\\H_1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta B\\\Delta L\\\Delta H\end{bmatrix}\\\begin{bmatrix}X_2\\Y_2\\Z_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X_1\\Y_1\\Z_1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta X\\\Delta Y\\\Delta Z\end{bmatrix}\end{aligned}\right\}\tag{8.55}$$

如果建立以固定点为原点的站心地平空间直角坐标系，则2号点在该坐标系内的 X、Y、Z 与基线向量 ΔX、ΔY、ΔZ 关系为：

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\sin B_1\cos L_1 & -\sin B_1\sin L_1 & \cos B_1\\-\sin L_1 & \cos L_1 & 0\\\cos B_1\cos L_1 & \cos B_1\sin L_1 & \sin B_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta X\\\Delta Y\\\Delta Z\end{bmatrix}\tag{8.56}$$

或

$$\begin{bmatrix}\Delta X\\\Delta Y\\\Delta Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\sin B_1\cos L_1 & -\sin L_1 & \cos B_1\cos L_1\\-\sin B_1\sin L_1 & \cos L_1 & \cos B_1\sin L_1\\\cos B_1 & 0 & \sin B_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}\tag{8.57}$$

如果以天顶距 $Z_天$，方位角 A 和水平距离 D 来表示2号点在该站心空间直角坐标系内的位置，则有

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}D\cos A\\D\sin A\\D\mathrm{contan}Z_天\end{bmatrix}\tag{8.58}$$

或

$$
\begin{aligned}
D &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\
A &= \arctan(Y/X) \\
Z_{天} &= \arctan(Z/D)
\end{aligned}
\tag{8.59}
$$

8.3.2 GPS 定位成果至国家/地方参考椭球的二维转换

GPS 定位技术用于测量，其所得结果多为三维的基线向量，而基线向量又构成一个 GPS 基线向量网。基线向量网是三维空间的，二维转换就是提取出三维基线向量中的二维信息，构成一个二维 GPS 向量网。

二维转换的目的是将三维的 GPS 基线向量网变换投影至国家大地坐标系或地方独立坐标系上去，或者说是将 GPS 基线网变换投影成与国家大地测量控制网或与地方独立测量控制网相匹配兼容。其要点是，使 GPS 基线向量网与常规地面测量控制网原点重合，起始方位一致，这样就使两者在方位上具有可比性，而在坐标和边长上只存在两个系统间的尺度差影响。下面介绍二维转换的基本方法和步骤。

(1)GPS 三维基线向量网的平移变换

设常规地面测量控制网的原点在国家大地坐标系中的大地坐标为 B_0、L_0、H_0，于是求得该点在国家大地坐标中的三维直角坐标 X_0、Y_0、Z_0，再设该点在 WGS—84 坐标系下的三维直角坐标为 X'_0，Y'_0，Z'_0，于是可求得 GPS 网平移至地面测量控制网原点的平移参数为

$$
\left.\begin{aligned}
\Delta X &= X_0 - X'_0 \\
\Delta Y &= Y_0 - Y'_0 \\
\Delta Z &= Z_0 - Z'_0
\end{aligned}\right\}
\tag{8.60}
$$

然后，以此平移参数对 GPS 网施行整体平移，即 GPS 网中每一点的 WGS—84 系坐标按下式变换就得到了在国家大地坐标系中的三维空间直角坐标：

$$
\left.\begin{aligned}
X_i &= X'_i + \Delta X \\
Y_i &= Y'_i + \Delta Y \\
Z_i &= Z'_i + \Delta Z
\end{aligned}\right\}
\tag{8.61}
$$

由于平移参数仅仅是根据原点在两系统的坐标差值确定的，因而确定了平移后的 GPS 网在原点上与原国家坐标完全相同。

利用高斯反算公式可求得各点在国家大地坐标系中的大地坐标 B_i、L_i、H_i。

(2)GPS 网在国家大地坐标系内的二维投影变换

经过平移变换后，GPS 网与地面网在原点上的坐标值已完全相同。也就是说位置基准相一致。为了使 GPS 网与地面网的方位基准相一致，即起始方位相同，可利用大地测量学中的赫里斯托夫第一类微分公式，即使得同一椭球面上的网互相匹配。公式如下：

$$
\left.\begin{aligned}
\mathrm{d}B_i &= P_1\mathrm{d}B_0 + P_3(\mathrm{d}S/S) + P_4\mathrm{d}A_0 \\
\mathrm{d}L_i &= Q_1\mathrm{d}B_0 + Q_3(\mathrm{d}S/S) + Q_4\mathrm{d}A_0 + \mathrm{d}L_0
\end{aligned}\right\}
\tag{8.62}
$$

式中 P_1、P_3、P_4、Q_1、Q_3、Q_4 为微分公式的系数，可参阅有关大地测量教科书。该式描述了坐标原点变化($\mathrm{d}B_0$，$\mathrm{d}L_0$)，尺度变化($\mathrm{d}S/S$)和方位变化 $\mathrm{d}A_0$ 对 i 点大地坐标(B_i，L_i)的影响。

GPS 网经过平移变换后，已在原点上与地面网完全重合，因此有

$$
\left.\begin{aligned}
\mathrm{d}B_0 &= 0 \\
\mathrm{d}L_0 &= 0
\end{aligned}\right\}
\tag{8.63}
$$

在进行二维投影变换时，通常不确知两网在尺度上的差异（这一问题将在GPS网与地面网联合平差时论述），因而可设

$$dS/S=0 \tag{8.64}$$

两网在起始方位上的偏差可以计算。设地面网原点至起始方位点的大地方位角为 A_0，GPS网在相应方位上的大地方位角为 A'_0，A_0 和 A'_0 可分别利用大地测量主题反解公式求得。于是

$$dA_0=A_0-A'_0 \tag{8.65}$$

于是，赫里斯托夫第一类微分公式就简化为

$$\left.\begin{aligned} dB_i &= P_4 dA_0 \\ dL_i &= Q_4 dA_0 \end{aligned}\right\} \tag{8.66}$$

最后得到GPS网各点在国家大地坐标系内与地面原点一致、起始方位一致的大地坐标

$$\left.\begin{aligned} \overline{B_i} &= B_i + dB_i \\ \overline{L_i} &= L_i + dL_i \end{aligned}\right\} \tag{8.67}$$

利用高斯正算公式即可算得GPS网各点在国家参考椭球上投影至高斯平面坐标系内的坐标 X_i 和 Y_i。

(3)GPS网投影变换至地方独立坐标系

GPS定位成果投影归算至地方独立坐标系的方法是把已经投影至国家大地坐标系上的GPS网再投影至测区平均高程面对应的椭球面上。

由第2章2.2.3节可知，地方独立坐标系对应着一个地方参考椭球，最简单的一个处理方法是，认为该椭球与国家参考椭球只存在长半径上的差异 da，因而根据椭球变换的投影公式可以计算由于引入测区平均高程面带来的大地经纬度微小变化：

$$\left.\begin{aligned} dB'_i &= \frac{\alpha \sin 2B_i}{M_i} da \\ dL'_i &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{8.68}$$

式中：$\alpha=\alpha_L$ 为国家或地方参考椭球扁率，a、e 为国家参考椭球的长半径和第一偏心率。

$$M_i=\frac{a(1-e^2)}{\sqrt{1-e^2\sin^2 B}}$$

于是GPS网各点在地方参考椭球上的大地坐标为

$$\left\{\begin{aligned} \overline{B'_i} &= \overline{B_i} + dB_i \\ \overline{L'_i} &= \overline{L_i} \end{aligned}\right. \tag{8.69}$$

在地方独立坐标系内，按高斯投影公式和该独立坐标系所采用的中央子午线 L_0 计算相应于平均高程面上的直角坐标，这时计算公式中与椭球半径有关的量都必须采用平均高程面对应的椭球长半径值计算，即必须知道地方参考椭球的几何参数，否则无法进行平面投影计算。

上述转换过程相当于保持参考椭球中心和扁率不变，使其膨胀至椭球面与平均高程面重合来完成这一特殊转换。另一种转换思想是保持参考椭球长半径和扁率不变，变换（即平移）椭球中心，椭球中沿过独立系原点的卯酉圈曲率半径和子午面上升至椭球面与测区平均高程面重合为止，然后再将GPS网整体投影转换至平面坐标系上。数值计算表明，两种转换方法的结果是一致的。

8.3.3 GPS定位成果至国家/地方参考椭球的三维转换

二维转换后GPS网与地面网在原点和起始大地方位上已完全重合一致，所谓三维转换就

是使 GPS 网与地面网在原点和空间起始方向上完全重合。转换过程如下：

(1)GPS 网的平移变换

GPS 网的平移变换就是使 GPS 网与地面网在原点上重合一致，方法同上述。

(2)GPS 网的旋转变换

GPS 网的旋转变换就是使 GPS 网与地面网在空间起始方向上重合一致。在原点建立站心地平坐标系，计算出 GPS 网与地面网在起始方向上的方位角 α 和高度角β。α 和β 的计算公式为：

$$\begin{aligned}\alpha &= \arctan\frac{Y}{X}\\ \beta &= \arctan\frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2}}\end{aligned}\tag{8.70}$$

于是，GPS 网与地面网在起始方向上的方位角差和高度角差为：

$$\begin{aligned}\mathrm{d}\alpha &= \alpha_{\mathrm{D}}-\alpha_{\mathrm{G}}\\ \mathrm{d}\beta &= \beta_{\mathrm{D}}-\beta_{\mathrm{G}}\end{aligned}\tag{8.71}$$

设 GPS 网各点三维转换前相对于原点的三维直角坐标差为 ΔX_i、ΔY_i、ΔZ_i，则各点以三维转换后相对于原点的三维直角坐标差 $\Delta\overline{X}_i$、$\Delta\overline{Y}_i$、$\Delta\overline{Z}_i$、ΔY_i、ΔZ_i 为

$$\begin{vmatrix}\Delta\overline{X}_i\\ \Delta\overline{Y}_i\\ \Delta\overline{Z}_i\end{vmatrix} = Q_0R_{\mathrm{D}}(\mathrm{d}\alpha,\mathrm{d}\beta)Q_0^{\mathrm{T}}\begin{vmatrix}\Delta X_i\\ \Delta Y_i\\ \Delta Z_i\end{vmatrix}\tag{8.72}$$

式中

$$Q_0=\begin{vmatrix}-\cos L_0\sin B_0 & -\sin L_0 & \cos L_0\cos B_0\\ -\sin L_0\sin B_0 & \cos L_0 & \sin L_0\cos B_0\\ \cos B_0 & 0 & \sin B_0\end{vmatrix}\tag{8.73}$$

$$R_{\mathrm{D}}(\mathrm{d}\alpha,\mathrm{d}\beta)=\begin{vmatrix}1 & \mathrm{d}\alpha & \cos\alpha_{\mathrm{D}}\mathrm{d}\beta\\ -\mathrm{d}\alpha & 0 & \sin\alpha_{\mathrm{D}}\mathrm{d}\beta\\ -\dfrac{\mathrm{d}\beta}{\cos\alpha_{\mathrm{D}}} & 0 & 1\end{vmatrix}\tag{8.74}$$

最后得各点经三维变换后在国家大地坐标系内的三维直角坐标为

$$\begin{cases}\overline{X}_i = X_i+\Delta\overline{X}_i\\ \overline{Y}_i = Y_i+\Delta\overline{Y}_i\\ \overline{Z}_i = Z_i+\Delta\overline{Z}_i\end{cases}\tag{8.75}$$

相应地亦可求得 GPS 网各点在国家大地坐标系内的大地坐标 B_i、L_i、H_i。

若要再将 GPS 网投影变换至地方独立坐标内，可利用上述作类似转换。

8.3.4 GPS 定位中坐标转换的应用

前面已经介绍了 GPS 定位中的坐标转换的基本原理和方法。目前市场上的各种 GPS 数据处理软件都具备进行坐标转换的计算功能。在 GPS 测量中，坐标转换的应用体现在以下三个方面。

(1)确定 GPS 网的起算点坐标

采用载波相位法可以获得精度较高的相对观测量，但网中已知点的位置必须与广播星历位于同一参考系中，即位于 WGS—84 坐标系中，因为在相对定位解中，应用了广播星历。显然，已知点的位置误差将引起相对定位误差。

在精度要求不高的小型 GPS 控制网中，一般可采用 C/A 码进行绝对测量获得网的起始点坐标，其绝对精度为十几米到几十米，一般认为它对相对测量带来的误差可以忽略，但在高精度控制网中，其影响是不能忽略的。尤其是美国随时可对 GPS 卫星采取 SA 措施，致使 C/A 码导航精度显著降低，如从无 SA 时的 ± 30m 降至 ± 150m，且所接受的载波频率有较大的随机漂移，致使绝对定位方法失效。

采用坐标转换方法获得已知点的绝对位置，是指采用已知的两参考系之间的转换参数，将已知点在参心坐标系(例如 1954 年北京坐标系)中坐标转换为 WGS—84 坐标系中的坐标。目前，全国 *A* 级和 *B* 级 GPS 网已经完成，所得到的转换参数可以完成米级精度的坐标转换。对于不具有该参数的用户，亦可用本部门已有的 GPS 成果，应用坐标转换的软件完成转换参数的解算。

(2)将 GPS 网点的坐标转换到工程项目所需的坐标系中

GPS 网数据处理后得到的各点位置是 WGS—84 坐标系中的坐标值，根据工程项目的要求，一般要对其进行转换。例如，在控制测图中，要将其转换至 1954 年北京坐标系。坐标转换的方法是在网中选择若干公共点(即同一点对应有两套坐标系中的坐标值)，从而求出两坐标系间的转换参数，进而实现全部 GPS 网点的坐标转换。

通常为了进行 GPS 网与地面网的联合平差，可首先利用上述转换方法，将 GPS 网转换至国家大地坐标系内或地方独立坐标系内，再进行平差计算。

(3)进行 GPS 网的外部检核

经过坐标转换后，由于 GPS 网与地面网在原点和起始方位上已完全重合一致，因此可将转换后 GPS 网中各点的坐标，各基线向量的方位角和边长与地面网中相应点的坐标，相应方向上的方位角和边长进行比较，可作为 GPS 网外部检核的一种结果。

8.4 基线向量网平差

我们知道，两个测站点的同步观测卫星数据，在 WGS—84 坐标系中经过平差计算，可以解算出一条三维基线向量 $b_{ij}=(\Delta X_{ij},\Delta Y_{ij},\Delta Z_{ij})$及其方差协方差阵 D_{ij}，对于多个测站或整个测区可以解算出众多的基线向量。如果将不同时段观测的基线向量互相连结，就可以组成 GPS 基线向量网。GPS 基线向量网的平差是以 GPS 基线向量为观测值，以其方差阵的逆阵为权，进行平差计算，消除其图形闭合差，求定各 GPS 网点的坐标并进行精度评定。

GPS 基线向量网的平差可以分为三种类型：一是经典的自由网平差，常称为无约束平差，即固定网中某一点坐标的平差。二是附合网平差，常称为约束平差，即以国家大地坐标系或地方坐标系的某些点的坐标、边长和方位角为约束条件，顾及 GPS 网与地面网之间的转换参数而进行的平差。三是 GPS 网与地面网联合平差，即除了 GPS 基线向量观测值和约束数据以外，还有地面网观测值如边长、方向和高差等，将这些数据一并进行平差。附合网平差和联合平差一般是在国家坐标系或地方坐标系内进行，平差完成后网点的坐标已属于国家坐标系或地方坐标系，因而这两种平差方法是解决 GPS 成果转换的有效手段。

GPS 基线向量网的平差可以选择三维平差模型，也可以选择二维平差模型。由于平差模

型不同,平差结果也会不完全相同。当进行二维平差时,应首先将三维基线向量及其方差阵转换至二维平差计算面。

8.4.1 GPS基线向量网的无约束平差

为了检验GPS基线向量网本身的内符合精度以及基线向量之间有无明显的系统误差和粗差,同时也为GPS大地高与公共点正常高联合确定GPS网控制点的正常高提供平差处理后的大地高数据,GPS基线向量网首先应进行无约束平差。

无约束平差的含义是:在一个控制网中,不引入外部基准,或者虽然引入外部基准,但不应引起观测值的变形和改正。

由于GPS基线向量本身提供了尺度基准信息和定向基准信息,这些基准信息都是属于WGS—84坐标系,所以进行三维无约束平差只需引入位置基准信息。引入位置基准的方法主要有两种:其一是网中有高级的GPS点时,将高级的GPS点的坐标作为网平差的位置基准;其二是网中无高级的GPS点时,取网中任意一点的伪距定位值作为固定点坐标的起算数据。

GPS基线向量网的无约束平差常用的是三维无约束平差法。

(1)基线向量的误差方程式

设网中固定点的点号为1,其坐标为(X_1,Y_1,Z_1),任意两点i、j的基线向量观测值为$(\Delta X_{ij},\Delta Y_{ij},\Delta Z_{ij})$,相应的基线向量观测值的改正数为$V_{\Delta X_{ij}}$、$V_{\Delta Y_{ij}}$、$V_{\Delta Z_{ij}}$;$X^0$、$Y^0$、$Z^0$以及$\mathrm{d}X$、$\mathrm{d}Y$、$\mathrm{d}Z$分别为坐标近似值及其改正值,则不含固定点的基线向量观测方程为

$$\begin{aligned}\Delta X_{ij}+V_{\Delta X_{ij}}&=(X_j^0-X_i^0)+(\mathrm{d}X_j-\mathrm{d}X_i)\\ \Delta Y_{ij}+V_{\Delta Y_{ij}}&=(Y_j^0-Y_i^0)+(\mathrm{d}Y_j-\mathrm{d}Y_i)\\ \Delta Z_{ij}+V_{\Delta Z_{ij}}&=(Z_j^0-Z_i^0)+(\mathrm{d}Z_j-\mathrm{d}Z_i)\end{aligned}\tag{8.76}$$

将上式写成矩阵形式的误差方程为

$$\begin{bmatrix}V_{\Delta X_{ij}}\\V_{\Delta Y_{ij}}\\V_{\Delta Z_{ij}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-1&0&0\\0&-1&0\\0&0&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{d}X_i\\\mathrm{d}Y_i\\\mathrm{d}Z_i\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{d}X_j\\\mathrm{d}Y_j\\\mathrm{d}Z_j\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\Delta X_{ij}+X_i^0-X_j^0\\\Delta Y_{ij}+Y_i^0-Y_j^0\\\Delta Z_{ij}+Z_i^0-Z_j^0\end{bmatrix}\tag{8.77}$$

它可简记为

$$V_{ij}=-E\mathrm{d}X_i+E\mathrm{d}X_j-L_{ij}\tag{8.78}$$

其对应的方差协方差阵为

$$\sum\nolimits_{ij}=\begin{bmatrix}\delta_{\Delta X}^2&\delta_{\Delta X\Delta Y}&\delta_{\Delta X\Delta Y}\\\delta_{\Delta Y\Delta X}&\delta_{\Delta Y}^2&\delta_{\Delta Y\Delta Z}\\\delta_{\Delta Z\Delta X}&\delta_{\Delta Z\Delta Y}&\delta_{\Delta Z}^2\end{bmatrix}\qquad P_{ij}=\sum\nolimits_{ij}^{-1}\tag{8.79}$$

含固定点的基线向量观测方程为

$$\begin{bmatrix}V_{\Delta X_{i1}}\\V_{\Delta Y_{i1}}\\V_{\Delta Z_{i1}}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{d}X_i\\\mathrm{d}Y_i\\\mathrm{d}Z_i\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\Delta X_{i1}+X_i^0-X_1\\\Delta Y_{i1}+Y_i^0-Y_1\\\Delta Z_{i1}+Z_i^0-Z_1\end{bmatrix}\tag{8.80}$$

它可简记为

$$V_{1i} = -E\mathrm{d}X_i - L_{1i} \tag{8.81}$$

(2)法方程式的组成及解算

由于各基线向量观测值之间相互独立，因而可分别对每个基线向量观测值的误差方程式组成法方程，将单个法方程的系数矩阵及常数项加到总法方程的对应系数项和常数项上去。对应于式(8.78)和式(8.81)的法方程式分别为

$$\left.\begin{aligned} +P_{ij}\mathrm{d}X_i - P_{ij}\mathrm{d}X_j + P_{ij}L_{ij} &= 0 \\ -P_{ij}\mathrm{d}X_i + P_{ij}\mathrm{d}X_j - P_{ij}L_{ij} &= 0 \\ -P_{il}\mathrm{d}X_i - P_{il}L_{il} &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{8.82}$$

总的法方程设为

$$N\mathrm{d}X - U = 0 \tag{8.83}$$

解算法方程得到求知数 $\mathrm{d}X$ 为

$$\mathrm{d}X = N^{-1}U \tag{8.84}$$

各待定点坐标平差值 X_i 为

$$X_i = X_i^0 + \mathrm{d}X_i \tag{8.85}$$

(3)精度评定

单位权方差估值为

$$\sigma_0^2 = \frac{V^{\mathrm{T}}PV}{3(m-n+1)} \tag{8.86}$$

式中：m——基线向量数；

n——总点数。

平差求知数 $\mathrm{d}X$ 的方差估值为

$$D_i = \sigma_0^2 N^{-1} \tag{8.87}$$

8.4.2 GPS基线向量网的三维平差

GPS基线向量网的三维平差包括两方面的内容：其一是GPS网的三维约束平差；其二是GPS网与地面网的三维联合平差。

8.4.2.1 GPS网三维约束平差

GPS网三维约束平差在国家大地坐标系统中进行，约束条件是属于国家大地坐标系统的地面网点的固定坐标、固定大地方位角和固定空间弦长。

为了将GPS基线向量网的观测值与约束条件联系起来，应考虑WGS—84坐标系与国家大地坐标系之间的系统差，即平差时应设立GPS网与地面网之间的转换参数。对于基线向量而言，不必考虑平移参数，只需考虑尺度参数 $\mathrm{d}m$ 和旋转参数 $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ 即可。

(1)GPS基线向量误差方程

在地面网所属的参考系中，可列出以大地坐标为未知参数的三维GPS基线向量观测值误差方程，即

$$\begin{bmatrix} V_{\Delta X} \\ V_{\Delta Y} \\ V_{\Delta Z} \end{bmatrix}_{ij} = -A_i \begin{bmatrix} \mathrm{d}B_i \\ \mathrm{d}L_i \\ \mathrm{d}H_i \end{bmatrix} + A_j \begin{bmatrix} \mathrm{d}B_j \\ \mathrm{d}L_j \\ \mathrm{d}H_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} \end{bmatrix} \mathrm{d}m + R_{ij} \begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{\Delta X} \\ L_{\Delta Y} \\ L_{\Delta Z} \end{bmatrix}_{ij} \tag{8.88}$$

式中：

$$A_i=\begin{bmatrix}-\frac{1}{\rho''}(M_i^0+H_i^0)\sin B_i^0\cos L_i^0 & \frac{1}{\rho''}(N_i^0+H_i^0)\cos B_i^0\sin L_i^0 & \cos B_i^0\cos L_i^0\\ -\frac{1}{\rho''}(M_i^0+H_i^0)\sin B_i^0\sin L_i^0 & \frac{1}{\rho''}(N_i^0+H_i^0)\cos B_i^0\cos L_i^0 & \cos B_i^0\sin L_i^0\\ -\frac{1}{\rho''}(M_i^0+H_i^0)\cos B_i^0 & 0 & \sin B_i^0\end{bmatrix}$$

$$(i=i,j) \tag{8.89}$$

$$R_{ij}=\begin{bmatrix}0 & -\Delta Z_{ij} & \Delta Y_{ij}\\ \Delta Z_{ij} & 0 & -\Delta X_{ij}\\ -\Delta Y_{ij} & \Delta X_{ij} & 0\end{bmatrix} \tag{8.90}$$

$$\begin{bmatrix}L_{\Delta X}\\ L_{\Delta Y}\\ L_{\Delta Z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Delta X_{ij}-(X_j^0-X_i^0)\\ \Delta Y_{ij}-(Y_j^0-Y_i^0)\\ \Delta Z_{ij}-(Z_j^0-Z_i^0)\end{bmatrix} \tag{8.91}$$

$$\begin{bmatrix}X_i^0\\ Y_i^0\\ Z_i^0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(N_i^0+H_i^0)\cos B_i^0\cos L_i^0\\ (N_i^0+H_i^0)\cos B_i^0\sin L_i^0\\ [N_i^0(1-e^2)+H_i^0]\sin B_i^0\end{bmatrix}(i=i,j) \tag{8.92}$$

$$-C_{ik}A_i\begin{bmatrix}dB_i\\ dL_i\\ dH_i\end{bmatrix}+C_{ik}A_k\begin{bmatrix}dB_k\\ dL_k\\ dH_k\end{bmatrix}+W_D=0 \tag{8.93}$$

式中：$(\varepsilon_x,\varepsilon_y,\varepsilon_z)$——WGS—84 系统与参考坐标系统的坐标轴定向未知数；

dm——尺度参数，它的定义式为

$$dm=(S_G-S_D)/S_D \tag{8.94}$$

式中：S_G、S_D 分别为 GPS 基线长与相应的地面网弦长。

定向未知数也可选择为地面参考原点的地平大地坐标系中绕天顶方向的旋转 dA，绕地平正北和地平正东的两个旋转 $d\eta$ 和 $d\xi$，即$(d\eta,d\xi,dA)$，这时有

$$R_{ij}=\begin{bmatrix}-\Delta Y_{ij}\cos B_k-\Delta Z_{ij}\sin B_k\sin L_k & \Delta Z_{ij}\cos L_k & -\Delta Y_{ij}\sin B_k+\Delta Z_{ij}\cos B_k\sin L_k\\ -\Delta X_{ij}\cos B_k+\Delta Z_{ij}\sin B_k\cos L_k & \Delta Z_{ij}\sin L_k & \Delta X_{ij}\sin B_k-\Delta Z_{ij}\cos B_k\cos L_k\\ \Delta X_{ij}\sin B_k-\Delta Y_{ij}\sin B_k\cos L_k & \Delta X_{ij}\cos L_k & -\Delta X_{ij}\cos B_k\sin L_k+\Delta Y_{ij}\cos B_k\cos L_k\end{bmatrix} \tag{8.95}$$

式中：下标 K 表示地面网的参考原点。

通常在数万平方公里的小区域 GPS 网的平差中，由于确定三个定向未知数的几何条件不足，只取 ε_z 或 dA 作为待定的未知参数，这时若选 ε_Z，则有

$$R_{ij}=\begin{bmatrix}\Delta Y_{ij}\\ -\Delta X_{ij}\\ 0\end{bmatrix} \tag{8.96}$$

若选 dA，则有

$$R_{ij}=\begin{bmatrix}-\Delta Y_{ij}\sin B_k+\Delta Z_{ij}\cos B_k\sin L_k\\ \Delta X_{ij}\sin B_k-\Delta Z_{ij}\cos B_k\cos L_k\\ -\Delta X_{ij}\cos B_k\sin L_k+\Delta Y_{ij}\cos B_k\cos L_k\end{bmatrix} \tag{8.97}$$

(2)约束条件方程

1)固定点坐标条件

设第 K 点为已知，当 K 点的坐标近似值取为固定值，则其坐标的约束条件为

$$\begin{bmatrix} dB_k \\ dL_k \\ dH_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8.98}$$

处理时，可将上式代入式(8.88)，消去相应的改正数。

2)固定弦长约束条件方程

设 D_{ik}为地面网中的高精度空间弦长，可用来作为 GPS 网平差的尺度基准，则有约束条件

$$-C_{ik}A_i \begin{bmatrix} dB_i \\ dL_i \\ dH_i \end{bmatrix} + C_{ik}A_k \begin{bmatrix} dB_k \\ dL_k \\ dH_k \end{bmatrix} + W_D = 0 \tag{8.99}$$

式中

$$C_{ik} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta X_{ik}}{D_{ik}} & \frac{\Delta Y_{ik}}{D_{ik}} & \frac{\Delta Z_{ik}}{D_{ik}} \end{bmatrix} \tag{8.100}$$

$$W_D = D_{ik}^0 - D_{ik} = \sqrt{(\Delta X_{ik}^0)^2 + (\Delta Y_{ik}^0)^2 + (\Delta Z_{ik}^0)^2} - D_{ik} \tag{8.101}$$

3)固定大地方位约束条件方程

设 F_{kj}为已知网的定向基准，则有条件式

$$-F_{kj}A_k \begin{bmatrix} dB_k \\ dL_k \\ dH_k \end{bmatrix} + F_{kj}A_k \begin{bmatrix} dB_j \\ dL_j \\ dH_j \end{bmatrix} + W_A = 0 \tag{8.102}$$

式中：

$$F_{kj} = \left[\frac{\sin A_{kj}^0 \sin B_k^0 \cos L_k^0 - \cos A_{kj}^0 \sin L_k^0}{D_{kj}^0 \sin Z_{kj}^0}, \frac{\sin A_{kj}^0 \sin B_k^0 \cos L_k^0 + \cos A_{kj}^0 \sin L_k^0}{D_{kj}^0 \sin Z_{kj}^0}, \frac{-\sin A_{kj}^0 \cos B_k^0}{D_{kj}^0 \sin Z_{kj}^0} \right] \tag{8.103}$$

$$W_A = A_{kj}^0 - A_{kj} = \arctan = \frac{(N_j^0 + H_j^0)\cos B_j^0 \sin(L_j^0 - L_k^0)}{X_{kj}^0} - A_{kj} \tag{8.104}$$

$$X_{kj}^0 = [\cos B_k^0 \cos B_j^0 - \sin B_k^0 \cos B_j^0 \cos(L_j^0 - L_k^0)](N_j^0 + H_j^0) + (N_k^0 \sin B_k^0 - N_j^0 \sin B_j^0) e^2 \cos B_k^0 \tag{8.105}$$

(3)法方程的组成及解算

法方程的组成及解算按附有条件的间接平差方法进行。

将误差方程式写成下述矩阵形式

$$V = A dB - L \tag{8.106}$$

将所有约束条件方程表示为

$$C dB + W = 0 \tag{8.107}$$

则法方程式可写为

$$\begin{bmatrix} N & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dB \\ K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -U \\ W \end{bmatrix} = 0 \tag{8.108}$$

式中：

$$N = A^{\mathrm{T}}PA \qquad U = A^{\mathrm{T}}PL$$
$$\mathrm{d}B = (\mathrm{d}B_1^{\mathrm{T}}, \mathrm{d}B_2^{\mathrm{T}}, \cdots, \mathrm{d}B_n^{\mathrm{T}}, \mathrm{d}m, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$$

K——联系数。

按高斯约化法求解

$$\left.\begin{aligned} K &= (CN^{-1}C^{\mathrm{T}})(W + CN^{-1}U) \\ \mathrm{d}B &= N^{-1}(U - C^{\mathrm{T}}K) \end{aligned}\right\} \tag{8.109}$$

平差后未知数的协因数阵为

$$\left.\begin{aligned} Q_{\mathrm{B}} &= N^{-1} + N^{-1}C^{\mathrm{T}}Q_{\mathrm{KK}}CN^{-1} \\ Q_{\mathrm{KK}} &= -(CN^{-1}C^{\mathrm{T}})^{-1} \end{aligned}\right\} \tag{8.110}$$

单位权中误差为

$$\sigma_0^2 = \frac{V^{\mathrm{T}}PV}{3m - t + r} \tag{8.111}$$

式中：m——GPS 基线向量个数；

t——未知数个数；

r——条件方程的个数。

平差后未知数的中误差为

$$D_{\mathrm{B}} = \sigma_0^2 Q_{\mathrm{B}} \tag{8.112}$$

8.4.2.2 GPS 网与地面网的三维联合平差

GPS 网与地面网的三维联合平差，是指除了上述 GPS 基线向量的观测方程和作为基准的地面网约束条件方程以外，还有常规大地测量观测值（如方向、距离、天顶距、水准高差，甚至还有天文经纬度和方位角等）一起进行的平差。

联合平差可以两网的原始观测量为根据，也可以两网单独平差的结果为根据。平差时，引人坐标系统的转换参数，平差的同时完成坐标系统的转换。

(1)空间弦长观测值的误差方程

GPS 基线向量的观测值误差方程和约束条件方程同三维约束平差，而地面网观测值的误差方程为

$$V_{S_{ij}} = -C_{ij}A_i\begin{bmatrix}\mathrm{d}B_i \\ \mathrm{d}L_i \\ \mathrm{d}H_i\end{bmatrix} + C_{ij}A_j\begin{bmatrix}\mathrm{d}B_j \\ \mathrm{d}L_j \\ \mathrm{d}H_j\end{bmatrix} - L_{S_{ij}} \tag{8.113}$$

式中：

$$L_{S_{ij}} = S_{ij} - \sqrt{(\Delta X_{ij}^0)^2 + (\Delta Y_{ij}^0)^2 + (\Delta Z_{ij}^0)^2}$$

A_i、A_j 的意义同式(8.89)，C_{ij} 意义同式(8.100)。

(2)方向观测值的误差方程

$$V_{\beta_{ij}} = -\mathrm{d}Z_i - F_{ij}A_i\begin{bmatrix}\mathrm{d}B_i \\ \mathrm{d}L_i \\ \mathrm{d}H_i\end{bmatrix} + F_{ij}A_i\begin{bmatrix}\mathrm{d}B_j \\ \mathrm{d}L_j \\ \mathrm{d}H_j\end{bmatrix} - L_{\beta_{ij}} \tag{8.114}$$

式中：

$$L_{\beta_{ij}} = \beta_{ij} + Z_i^0 - \alpha_{ij}^0 \tag{8.115}$$

在实用中，其它类型的常规大地测量观测值参与联合平差较为少见，其误差方程此处就不

再介绍了。

法方程的组成与解算以及精度评定与三维约束平差相同。求单位权方差时自由度的计算中应加上地面观测值个数。

8.4.2.3 验后单位权方差的检验

三维平差后应对单位权方差的估值进行检验。假定验前单位权方差 $\sigma_0^2=1$ 时，方差因子的检验方法如下：

设统计检验量为 x，则

$$x^2 = V^{\mathrm{T}}PV \sim x^2(f) \tag{8.116}$$

零假设 $H_0:\hat{\sigma}_0^2=1$

备选假设 $H_1:\hat{\sigma}_0^2\neq 1$

选置信水平 $1-\alpha$，如果

$$x_{p_1}^2 \leqslant V^{\mathrm{T}}PV \leqslant x_{p_2}^2 \tag{8.117}$$

或者

$$\frac{V^{\mathrm{T}}PV}{x_{p_1}^2} \leqslant \hat{\sigma}_0^2 \leqslant \frac{V^{\mathrm{T}}PV}{x_{p_2}^2} \quad \left(p_1 = 1-\frac{\alpha}{2}, p_2 = 1-\frac{\alpha}{2}\right) \tag{8.118}$$

上式成立则接受零假设。否则拒绝零假设，而要采用一定的方法分析研究，究竟是函数模型误差还是随机模型误差或者起算数据误差。

如果平差后方差的估值与其理论取值 1 相差甚远时，往往是由下述原因引起：

(1)函数模型的缺陷

这里包括 GPS 基线向量中个别的有较明显的粗差或偶然有某些没有被模型化(或称参数化)的系统误差。如 GPS 网中基线向量可能不是同一时期观测的，本身之间尺度标准不一致；或者地面网方向、边长观测数据有明显粗差；或者没有被模型化的系统误差；或者引人的尺度或残余定向改正参数不恰当等等。

(2)起算数据的误差

当作为 GPS 网约束平差的固定基准，如坐标、边长、方位的误差过大时，往往也导致验后方差因子与 1 相差甚远。这时应检查哪些起算数据可能有较大的误差而不予采用。这也说明作为基准的起算数据应与 GPS 测量所含基准基本相容，否则会降低 GPS 精度。

(3)随机模型不准确

即 GPS 基线向量的先验方差因子与地面网边长、方向观测值的方差因子先验方差因子比例不恰当。如果边长、方向观测值的精度估算方法和公式是经检验后认为正确可信的话，这种比例不恰当多半是 GPS 基线向量的方差因子不恰当之故。这一问题可采用方差分量估计的方法改善随机模型。

同样如果平差后转换参数中的某一个或几个数值小到可以忽略时，或虽然有一定大小，但其误差大到足以证明这一数值不可信时，也应该通过参数的显著性的统计假设检验确定平差中是保留这种参数还是舍去这种参数重新进行平差。

8.4.3 GPS 基线向量网的二维平差

GPS 基线向量网的二维平差，可以在参考椭球面上进行，也可以在高斯投影平面上进行。该平差可以分为 GPS 网的二维约束平差和 GPS 网与地面网的联合平差。

在进行 GPS 网二维平差前应首先将三维基线向量转换成二维基线向量。实用转换方法是以国家或地方坐标系中的一个已知点和一个已知方向作为起算数据，取得位置基准和方位基准的一致性，这一转换方法保证了转换后的 GPS 网与地面网在一个起算点上位置重合，在一条基线方向上方位一致。也避免了三维基线向量转换成二维基线向量时，由于地面网大地高不准确引起的尺度误差和变形，保证 GPS 网转换后整体及相对几何关系的不变性。转换后的 GPS 网与地面网之间只存在尺度差和残余的定向差，因而进行二维平差时只要考虑两网之间的尺度差和残余的定向差参数。

8.4.3.1　GPS 网二维约束平差

(1)GPS 基线向量观测方程为

$$\begin{bmatrix} V_{\Delta X_{ij}} \\ V_{\Delta Y_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_i \\ dY_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_j \\ dY_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} \end{bmatrix} dm + \begin{bmatrix} +\Delta Y_{ij}/\rho'' \\ -\Delta X_{ij}/\rho'' \end{bmatrix} d\alpha - \begin{bmatrix} L_{\Delta X_{ij}} \\ L_{\Delta Y_{ij}} \end{bmatrix} \tag{8.119}$$

式中 dm 是尺度改正数，其定义式为

$$dm = (S_G - S_D)/S_D \tag{8.120}$$

$d\alpha$ 是残余定向误差改正数，其定义式为

$$d\alpha = \alpha_G - \alpha_D \tag{8.121}$$

还有

$$\begin{bmatrix} L_{\Delta X_{ij}} \\ L_{\Delta Y_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} + X_i^0 - X_j^0 \\ \Delta Y_{ij} + Y_i^0 - Y_j^0 \end{bmatrix} \tag{8.122}$$

以上各式中的下标 G 和 D 分别表示边长、方位和坐标差的 GPS 系统和地面网系统。当网中有已知点的坐标约束时，即上述 GPS 基线向量的起点或端点与已知点相连时，则已知点相应的坐标改正数 dX_i，dY_i 和 dX_j，dY_j 为零。

(2)约束条件方程

当网中有边长约束时，则边长约束的条件方程为

$$-\cos\alpha_{jk}^0 dX_j - \sin\alpha_{jk}^0 dY_j + \cos\alpha_{jk}^0 dX_k + \sin\alpha_{jk}^0 dX_k + W_s = 0 \tag{8.123}$$

式中：

$$W_s = \sqrt{(X_k^0 - X_j^0)^2 + (Y_k^0 - Y_j^0)^2} - S_{jk} \tag{8.124}$$

式中 S_{jk} 为已知边的边长，它是 GPS 网的尺度标准。

当网中有已知方位的约束时，则方位的约束的条件方程为

$$a_{jk} dX_j + b_{jk} dY_j - a_{jk} dX_k - a_{jk} dY_k + W_a = 0 \tag{8.125}$$

式中：

$$a_{jk} = \frac{\rho''\sin\alpha_{jk}^0}{S_{jk}^0} \qquad b_{jk} = \frac{\rho''\cos\alpha_{jk}^0}{S_{jk}^0} \tag{8.126}$$

$$W_a = \arctan\frac{Y_k^0 - Y_j^0}{X_k^0 - X_j^0} - \alpha_{jk} \tag{8.127}$$

式中：α_{jk}——已知的方位，它是 GPS 网的外部定向基准。

8.4.3.2　GPS 网与地面网的二维联合平差

GPS 网与地面网的二维联合平差，是在上述的 GPS 基线向量观测方程和约束条件方程的

基础上，加上地面网的方向和边长观测方程。它们分别是：

（1）方向误差方程式

$$V_{kj} = -dZ_k + a_{kj}dX_j + a_{kj}dY_j - a_{kj}dX_k - a_{kj}dY_k - l_{kj} \tag{8.128}$$

相应观测值的权为 P_{kj}，常数项为 $l_{kj} = Z_k^0 + L_{kj} - a_{kj}^0$。这里 Z_k^0 是测站定向未知数的近似值，dZ_k 是相应的改正数，a_{kj}^0、a_{kj}、b_{kj} 与上款所述公式意义相同。

（2）边长误差方程式

$$V_{S_{ij}} = -\cos a_{ij}^0 dX_i - \sin a_{ij}^0 dY_j + \cos a_{ij}^0 dX_k + \sin a_{ij}^0 dY_k - l_{S_{ij}} \tag{8.129}$$

相应的权为 $P_{S_{ij}}$，常数项为

$$l_{S_{ij}} = S_{ij}^0 - S_{ij} \tag{8.130}$$

同三维平差一样，在列出二维 GPS 基线向量和地面数据的误差方程和条件方程以后，按附有条件的间接平差法求解，并对平差结果进行精度评定；同样也需要对单位权方差的估值进行检验，以排除函数模型误差和起算数据误差，减小平差中随机模型误差。并且对平差后得到尺度改正参数 dm 和残余的定向误差参数 $d\alpha$ 值进行显著性假设检验，这里就不再介绍了。

8.4.4 平差实施及成果应用

（1）数据准备

参与平差时数据可以分为三类：一是 GPS 基线向量观测值；二是地面网观测值；三是地面网的约束数据。

GPS 基线向量观测值由 8.2 节所述方法求得。对于 m 台接收机观测的同步图形来说，总共可以算得 $m(m-1)/2$ 条基线结果，但其中只有 $(m-1)$ 条基线是独立的，因而存在基线向量观测值的选择问题。选择基线向量的基本原则是：

①只选择同步图形中的独立基线；

②所选基线不仅其同步环检查合格，更应是非同步环检查合格，否则就应怀疑环中某一条或几条基线的处理结果不够理想，换之以对应同步图形中的其它基线，或作精化处理或舍去不用；

③不应出现自由基线。自由基线是指不属于任何非同步图形闭合条件的基线。由于自由基线不具备发现粗差的能力，因而必须避免它的出现，这也是进行 GPS 网优化设计须考虑的。

按照以上原则选择和确定参加平差的独立基线向量后，应将各基线的向量坐标及其方差、协方差阵从各基线处理结果文件中提取出来，存入基线向量观测值文件内。若要进行二维平差，则应将三维基线向量及方差、协方差阵转换成二维基线向量及方差、协方差阵。地面网观测值数据也应文件化，特别是方向观测值一般都要完成测站平差和归心改正等项工作。该项工作同地面网平差时相类似。

（2）平差计算

各类数据文件化后，就可以调用平差程序进行计算。目前国内已研制出较多的 GPS 综合数据处理软件包，例如武汉大学测绘学院研制的“POWERADJ”；上海同济大学测量系研制的“TGPPS”；武汉中国科学院测量与地球物理研究所研制的“IGGC”等等。国际上流行的平差程序为 Geolab 软件包。

（3）成果分析及应用

完成平差计算后应对成果进行分析。分析的主要内容有：

①GPS基线向量网成果的内精度。这是根据无约束平差成果进行分析的，主要考察内容有：基线向量观测值改正数分布有无明显粗差；平差各点坐标中误差、点位中误差、以及GPS基线向量边的方位角中误差和边长相对中误差是否符合要求。若发现有明显的粗差，则应在进行约束平差或联合平差前剔除。

②联合平差或约束平差成果的精度分析。考察各类观测值的改正数分布有无明显粗差，若有明显粗差，应剔除后重新平差。考察平差坐标及点位精度，转换参数的大小及精度，单位权中误差是否通过了统计检验，边长相对精度等是否满足网的设计等级精度要求。

③三维平差结果和二维平差结果的互相比较。

④平差成果的外部检核。这种外部检核通常是通过高精度光电测距边来进行的，以此检测平差成果的真实精度。

各项数据分析均满足网的设计精度要求时，平差成果就可以正式交付使用。

8.4.5 GPS网平差软件(POWERADJ)简介

POWERADJ是由武汉大学测绘学院研制并经多次改进的全汉化GPS网和地面网平差软件包。该软件要求在WINDOWS95/98环境下运行，它所采用的原始数据是GPS基线向量和它们的方差——协方差阵，或者是具有诸如方向观测值、边长观测值等地面网数据，可进行测角网、边角网、测边网、导线网以及GPS基线向量网的单独平差，混合平差以及常规网与GPS网的二维、三维联合平差功能，平差得到的是所需要的国家或地方坐标系成果。此外还提供GPS大地高与水准高程拟合，并转换为实用的正常高或正高。

8.4.5.1 POWERADJ软件系统的菜单结构

POWERADJ软件系统的菜单由主菜单和下拉式菜单构成，如表8.6所示，是用户执行某项操作或者进入某种状态的主要手段。

POWERADJ软件系统的菜单结构 表8.6

配置	数据输入	预处理	平差	图形	结果	坐标转换
工程管理	网的信息	自动预处理	三维平差	基线向量图	结果分析	计算转换参数
选择工程	约束数据	手工预处理	二维平差	误差椭圆图	打印图形	坐标转换
新建工程	观测数据		高程拟合	三维误差图	结果编辑打印	BL—XY
接收机	基线文件			重画	超出限差	BLH—XYZ
控制网				放大		换带计算
坐标系统						高程异常内插
退出						

每一菜单项的主要功能列举如下：

(1)配置

在此主菜单下，可进行工程项目的管理、接收机型号及标称精度的选定、控制网的等级和平差所在的坐标系统选择。在项目的管理中可以新建、修改、删除和选择项目；平差所在的坐标系统可供选择的有1954年北京坐标系、1980年西安坐标系、1984世界坐标系和地方独立坐标系。

(2)数据输入

数据输入部分包括地面网信息部分、已知约束数据、地面观测数据、GPS 基线向量文件四个部分。网的信息主要是用于输入 GPS 网约束平差的各种已知数据个数和观测数据个数以及相应先验信息；已知约束数据主要包括固定点坐标、已知高程、固定边长、固定坐标方位角四个部分；地面观测数据主要供二维联合平差用，包括方向观测值和边长观测值及其相应的先验信息和方向归心改正等，如果某项按钮变灰表示该项无数据输入；该软件可以提取 Trimble、Ashtech、Leica、Rogue 等随机软件和武汉大学测绘学院的 Lip 软件解算的基线向量，提取的基线向量可以是双差固定解、浮动解、三差解。

(3)预处理

进行 GPS 网平差要进行预处理，主要目的是剔除含有粗差的基线向量，计算同步环、重复基线和异步环闭合差，选择独立基线参与 GPS 网的平差。预处理可以采取自动构网方式，相应的自动计算各类闭合差；如果对自动构网不满意，也可以采取手工构网方式，在网图上手工构环计算闭合差。

(4)平差

经过预处理后的独立 GPS 基线向量，可以构网进行二维平差或三维平差，还可以进行 GPS 水准高程的拟合。无论是二维平差还是三维平差，均应进行一个无约束平差作为网平差的基础。

无约束平差用于 GPS 网的内部精度分析、粗差分析和网的单位权方差因子估计。该软件能自动探测并剔除粗差基线，自动检验并调整方差因子。

(5)图形

在此菜单下，可以显示 GPS 基线向量网图、误差椭圆图和误差椭球图；还可以进行网图的重画和放大等操作。

(6)结果

在此菜单下，可以进行二维平差和三维平差的结果分析，网图打印；还可以调用写字板来查阅运行的各种结果，也可以编辑打印输出。

(7)坐标转换

在此菜单下，可以进行计算和换算。如已知两个不同坐标系统的公共点坐标，可以确定两个坐标系统之间的转换参数；已知两个不同坐标系统间的转换参数，可以进行两个坐标系间的坐标换算；可以进行高斯投影的正反算和换带计算以及高程异常的内插计算。

8.4.5.2 POWERADJ 软件系统的基本操作流程

(1)新建工程

平差之前为 GPS 控制网建一个工程项目，选择【**配置**】中的【**新建工程**】菜单，输入工程名称、测量单位、负责人等信息，然后按【**完成**】按钮。

注意：输完一项时，不要按回车建，可按 Tab 建或用鼠标键移到下一项，全部输入完毕时按完成按钮，所有输入部分都一样，以后不再说明。

(2)选择处理基线的软件类型

选择【**配置**】中的【**接收机**】菜单，用键盘或鼠标选择基线处理软件的类型及相应的接收机的标称精度(例如选 ASHTECH)。

(3)选择平差所在的坐标系统

平差结果的坐标系，可供选择的有国家 1954 年北京坐标系，国家 1980 年西安坐标系，

WGS—84坐标系和独立坐标系。

(4)输入网的信息

选择【**数据输入**】中的【**网的信息**】菜单，主要输入约束数据数目和中央子午线经度(例如固定点个数为2，中央子午线经度为117度)。

(5)输入已知数据

选择【**数据输入**】中的【**约束数据**】菜单，输入已知约束数据。例如，选择固定点的坐标输入，显示一个数据列表，按增加按钮，输入数据：1号点，固定三维坐标，$x = 2826992.02$，$y = 707211.10$，大地高 $H = 659.60$；2号点，固定平面坐标 $x = 2804670.57$，$y = 693003.43$。然后选择高程数据输入，输入水准点的高程，1号点639.43、2号点682.83、11号点90.80、20号点123.23。

(6)输入基线解文件

选择【**数据输入**】中的【**基线文件**】菜单，输入基线解文件。例如，选定双差固定解，输入PowerAdj系统目录下的DEMO目录所有O*.*文件，可以用通配符O*.*和全选按钮来选择。

(7)预处理和平差

选择预处理中的【**自动预处理**】，预处理完毕后，即可进行【**三维平差**】和【**二维平差**】，【**高程拟合**】(在平差菜单中选择)。

(8)结果打印

选择结果分析菜单，打印网图、闭合差文件、二维平差、三维平差、高程拟合结果文件。

8.5 GPS测量技术总结

8.5.1 技术总结

GPS测量的技术设计、数据采集和数据处理结束后，应及时编写技术总结，其内容要点如下：

(1)项目名称、任务来源、施测目的、施测单位、作业时间及作业人员情况；

(2)测区范围与位置、自然地理条件、气候特点、交通及电讯、电源情况；

(3)测区内已有测量资料情况及检核、采用情况；

(4)坐标系统与起算数据的选定，作业的依据及施测的精度要求；

(5)GPS接收机的类型、数量及相应的技术参数，仪器检验情况等；

(6)选点和埋石情况，观测环境评价及与原有测量标志的重合情况；

(7)观测实施情况，观测时段选择，补测与重测情况以及作业中发生与存在的问题说明；

(8)观测数据质量分析与野外检核计算情况；

(9)数据处理的内容、方法及所用软件情况、平差计算和精度分析；

(10)成果中尚存问题和需要说明的其它问题；

(11)必要的附表和附图。

8.5.2 成果验收

送交验收的成果包括：观测记录的存储介质及其备份，内容与数量齐全、完整无损，各项注

记、整饰应符合要求。

验收重点包括：

(1)实施方案是否符合规定和技术设计要求；

(2)补测、重测和数据剔除是否合理；

(3)数据处理的软件是否符合要求，处理的项目是否齐全，起算数据是否正确；

(4)各项技术指标是否达到要求；

(5)验收完成后，应写出成果验收报告，在验收报告中对成果的质量作出评定。

8.5.3 上交资料

GPS测量任务完成后，各项技术资料均应仔细加以整理，并经验收后上交，以提供给用户使用。上交资料的内容一般应包括：

(1)测量任务书与技术设计；

(2)GPS网展点图；

(3)GPS控制点的点之记、测站环视图；

(4)卫星可见性图、预报表及观测计划；

(5)原始数据软盘、外业观测手簿及其它记录(如归心元素)；

(6)GPS接收机及气象仪器等检验资料；

(7)外业观测数据的质量评价和外业检核资料；

(8)数据处理资料和成果表(包括软盘存储的有关文件)；

(9)技术总结和成果验收报告。

9 GPS精密高程测量

GPS以其精度高、速度快、经济方便等优点，在布设各种形式的控制网、变形监测网及精密工程测量等诸多方面都得到迅速、广泛的应用。国内外大量实践证明，GPS平面相对定位精度已达到了0.1ppm(1×10^{-7})，甚至更高，这是常规地面测量技术难以比拟的。即使是较大规模的GPS网，借助于精密星历和高精度相对定位软件，很容易获得水平方向重复性优于1×10^{-8}的相对定位结果。但是GPS高程测量的精度还不够高，影响了GPS三维控制网和垂直形变监测网的应用，在某种程度上讲，GPS可以提供三维坐标的优越性未能得到充分发挥。近十年来，国内外测绘界已做了大量试验，并进行了深入细致的研究，发现影响GPS高程测量精度的主要因素有两个：(1)电离层和对流层对GPS信号的折射严重影响GPS测量定位的垂直分量的精度；(2)受区域性似大地水准面精度影响，GPS测量的大地高在向正常高转换过程中，精度受到较大损失。因此，要提高GPS高程测量精度，一定要解决好上述两方面的问题。目前众多学者在研究这两方面的问题，也取得了不少突破性进展。

9.1 高程系统

(1)大地高高程系统

以参考椭球面为高程基准面的高程系统称为大地高高程系统。GPS测量所求得的高程是相对于WGS—84椭球面而言的，即GPS高程是大地高，记为H_{GPS}。H_{GPS}仅具有几何意义而缺乏物理意义，因此，它在一般的工程测量中不能直接应用。

(2)正高高程系统

正高高程系统是以大地水准面为高程基准面，地面上任意一点的正高高程是该点沿垂线方向至大地水准面的距离。如图9.1，A点的正高为：

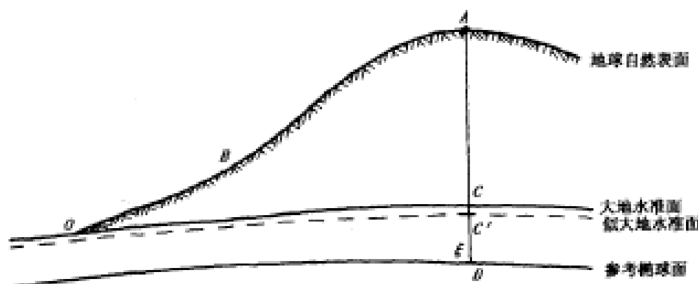


图9.1 高程系统

$$H_{正}^{A}=\int_{CA}\mathrm{d}H=\frac{1}{g_{m}^{A}}\int_{OBA}g\mathrm{d}h \tag{9.1}$$

式中：g_{m}^{A}——A点铅垂线上AC线段间的重力平均值；

dh 和 g——分别为沿 OBA 路线所测得的水准高差和重力值。

由于 g_m^A 并不能精确测定，也不能由公式推导出来，所以，严格说来，地面点的正高高程不能精确求得。通常采用近似方法求正高的近似值，A 点的近似正高计算公式为：

$$H_{近}^{A}=\frac{1}{\gamma_m^A}\int_{OBA}\gamma dh \tag{9.2}$$

式中：γ——正常重力值。

正常重力值并不顾及地球内部质量密度分布的不规则现象，因此，它仅随纬度的不同而变化，计算公式为：

$$\gamma=\gamma_{45°}(1-\alpha\cos 2\varphi+\cdots) \tag{9.3}$$

式中：$\gamma_{45°}$——纬度45°处的正常重力值；

φ——某点的纬度；

α——常数，$\alpha\approx 0.0026$。

由于地球内部质量分布并不是均匀的，因此，正常重力值 γ 与实测重力值 g 并不相同，在某些地区（如我国西部高山地区）差异很大，因此，近似正高在这些地区会受到较大的歪曲。

(3)正常高高程系统

以似大地水准面为基准面的高程系统称为正常高高程系统。正常高高程计算公式为：

$$H_{常}^{A}=\frac{1}{\gamma_m^A}\int_{OBA}g dh \tag{9.4}$$

由上式与式(9.1)比较可知，正高高程无法精确求得，但正常高高程可以精确求得。在式(9.4)中，g 可由重力测量结果求得，dh 可由水准测量的结果求得，而 γ_m^A 可由正常重力公式计算求得。因此，我国现在使用的高程系统为正常高高程系统。

(4)GPS大地高转换为正常高的方法

在普通地面测量中，点的正常高一般是通过水准测量求得的。水准测量所得的两点间的高差，加上正常水准面不平行改正和重力异常改正，即为两点间的正常高高差。水准测量是当前公认的最精密的高程测量技术之一。GPS测量所得的大地高必须将其转换为正常高后才能在工程测量中应用。将GPS大地高转换为正常高的方法有：利用重力测量方法、模拟内插法、平差转换法、联合平差法、神经网络方法等，这部分内容将在本章后半部分详细讨论。

9.2 大气对流层折射概述

大气对GPS信号的折射是影响高精度GPS平面相对定位及垂直方向重复性的重要因素之一，其中电离层折射的影响对GPS相对定位的影响已很小，其原因是：电离层折射的影响可通过改正模型进行改正，以及利用双频接收机进行双频改正，而且通过双差观测值也可得到有效消除。而对流层折射影响对GPS相对定位的影响较大，一方面其改正模型的精度不高，另一方面对流层折射影响在双差观测值中不能得到有效消除。因此，近几年来，提高GPS网精度(尤其是GPS高程测量精度)的主要研究工作便集中到对流层的改正方法上。

由于对流层中的物质分布在时间和空间上具有较大的随机性，因而使得对流层折射延迟亦具有较大的随机性。实际上，对流层折射影响是由干燥气体和水蒸气产生的影响共同组成的，即：

$$\Delta D_{trop}=(\rho_d+\rho_w)m(ei) \tag{9.5}$$

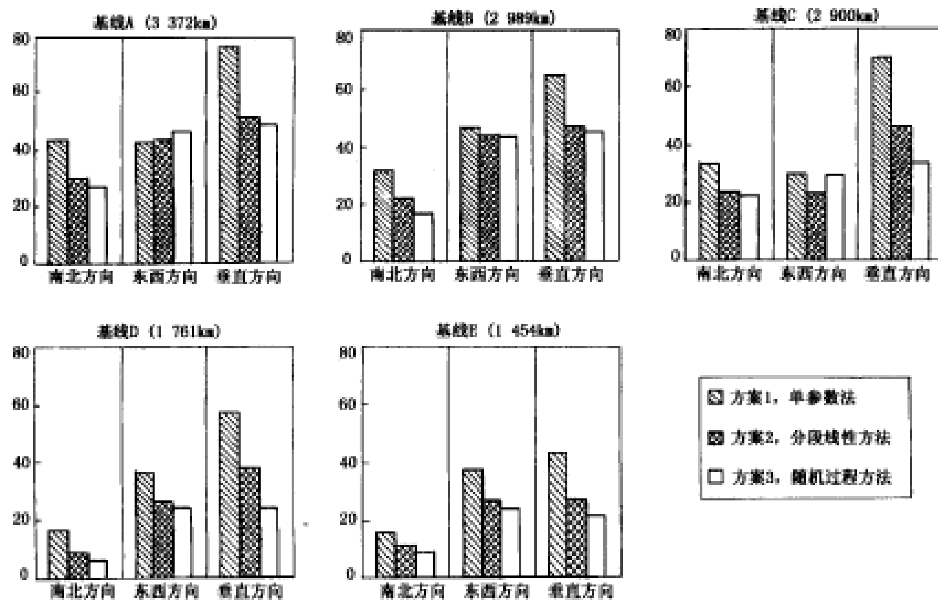


图 9.2 模拟对流层折射影响的三种不同方案重复性比较

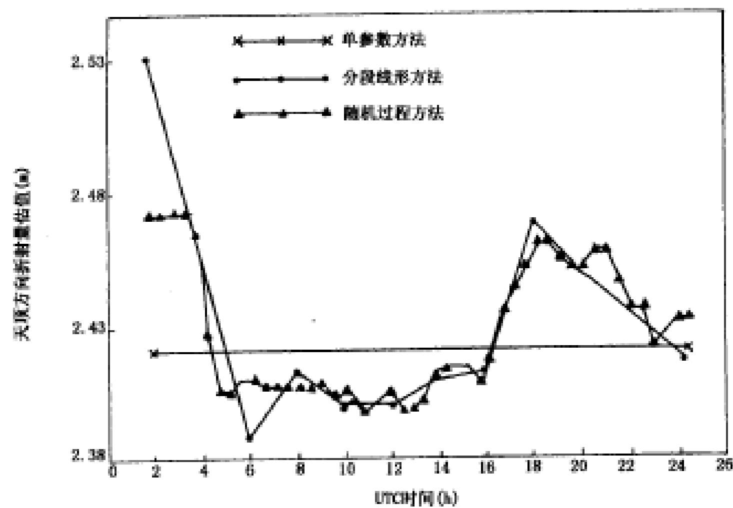


图 9.3 三种不同方案的天顶方向对流层折射估值

③每 4h 附加 1 个状态未知数，即每个测站取 4 个参数；

④每 2h 附加 1 个状态未知数，即每个测站取 8 个参数；

⑤每 1h 附加 1 个状态未知数，即每个测站取 16 个参数；

⑥每 0.5h 附加 1 个状态未知数，即每个测站取 32 个参数；

图 9.4 为 B 网中的 DS 站至其它各点共 5 条基线由不同方案算出的在各个方向的重复性比较。每幅图从左到右的 3 个子图分别表示南北、东西和垂直方向的重复性，每个子图的 6 个直方图依左到右分别表示第 1 到第 6 种方案的结果。

从图 9.4 中不难看出，第 1 种方案效果最差，后 5 种方案在东西方向和垂直方向的重复性

式中：ΔD_{trop}——对流层折射对 GPS 信号所产生的等效路径延迟；

ρ_d、ρ_w——分别为干、湿气体所产生的误差分量；

$m(ei)$——与传播路径高度角 ei 有关的投影函数。

众多研究表明，干燥气体引起的误差，约占整个延迟量的 80%，干分量折射比较稳定，天顶方向的折射量随时间和空间的变化率比较稳定（约为 2cm/hour），这一部分影响量可通过模型改正（如 Hopfield 模型）得到较好的消除，经改正后误差仅为 1%。水蒸气引起的误差约占总延迟量的 20%，湿分量折射却很不稳定，其天顶方向的折射量随时间和空间的变化率可能达到 6～8cm/hour，是干分量变化率的 3～4 倍，湿气延迟很复杂，影响因素较多，且利用改正模型进行改正的精度只能达到 20%～10%。因此，如何采用更精确有效的方法对湿分量 ρ_w 来模拟计算，就成为提高 GPS 高程测量精度的关键。

目前，对流层折射改正模型普遍采用 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型，这些模型都只考虑了测站的大气压、湿气压、温度、测站高以及测站纬度等因素，由于测站气象元素并不能很好的表征传播路径上的气象条件，因此，改正模型并不能很好地模拟实际的对流层折射影响，尤其是其中的湿分量的影响。为了提高对流层折射模拟精度，利用水蒸气辐射仪直接观测湿分量折射量数据是一种有效的方法，但水蒸气辐射仪比较笨重，价格又很昂贵，且使用不方便。因此，模拟对流层折射影响的最有效办法是在平差过程中采用附加未知参数的方法。如何设置附加未知参数则是下节讨论的主要内容。

9.3 模拟对流层折射影响的方法

(1)单参数方法

单参数方法假设每个测站天顶方向的对流层折射的模型改正值与实际折射量之间存在一常数偏差 ρ_k（k 表示测站），则相应传播路径上的对流层折射为：

$$\Delta D_{trop} = (\rho_d + \rho_w + \rho_k)m(ei) \tag{9.6}$$

(2)多参数方法

为了进一步模拟改正模型偏差随时间的变化，采用每隔一定的时间间隔 ΔT 增加一个天顶方向折射参数的多参数方法：

$$\Delta D_{trop}(t) = (\rho_d + \rho_w + \rho_{K,t_i})m(ei) \tag{9.7a}$$

$$T_{i-1} \leqslant t < T_i, T_i = T_{i-1} + \Delta T \tag{9.7b}$$

如果 ΔT 等于观测数据的历元间隔，即每个测站每个历元都引入一个天顶方向折射参数。从理论上讲，这样可以精确补偿改正模型的误差，但参数越多，整个解的强度越差。过多的附加参数可能会导致法方程病态。因此，多参数方法中的 ΔT 应适当选择。ΔT 过大，会造成折射参数太少，不能反映出折射估值随时间的变化趋势，从而影响解的精度。ΔT 过小，又会造成折射参数太多，未知参数太多会影响解的可靠度，解甚至失真。

(3)一阶高斯马尔可夫过程

1)引言

由于大气层中水蒸气分布随时间的不规则变化，使对流层折射对观测值的影响具有较大的随机性。因此，应该用动态误差的随机过程来模拟这些因素的影响。

随机过程用具有先验统计信息的状态参数描述。包含状态参数的估计问题一般要用滤波

方法处理。滤波方法具有实时输出状态参数及其方差估值，以及占用计算机内存少的优点；但是状态参数，特别是其方差的更新需要大量的计算时间。如果把状态方程及状态参数的先验信息转化为相应的观测方程，用最小二乘估计与用卡尔曼滤波估计是等价的，其主要问题是状态参数的每次实现都要作为未知参数，从而需要大量的计算机内存和计算时间。最小二乘递推算法能有效地克服以上两种方法的不足之处，实现随时间变化物理因素的随机过程模拟。

2)随机过程方法

对流层折射模型改正的误差主要源于大气层中的水蒸气在时间和空间上的随机变化。根据对水蒸气辐射仪观测的湿分量折射量的分析发现，天顶方向的湿分量折射变化规律可以用一阶高斯马尔可夫过程模拟。连续的一阶高斯马尔可夫过程的状态方程为：

$$\frac{\mathrm{d}\rho(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\tau_\rho}\rho(t)+W(t) \tag{9.8}$$

式中：τ_ρ——随机过程的相关时间；

$W(t)$——方差为 σ_w 的零均值高斯白噪声。

式(9.8)的离散解为：

$$\rho(i+1)=m(i)\rho(i)+\overline{W}(i) \tag{9.9a}$$

$$m(i)=e^{-\frac{t_{i+1}-t_i}{\tau_\rho}}=e^{\frac{\Delta t}{\tau_\rho}} \tag{9.9b}$$

$$\overline{W}(i)=\int_{t_i}^{t_{i+1}}e^{\frac{t_{i+1}-\tau}{\tau_\rho}}W(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{9.9c}$$

$$\sigma^2_{\overline{W}(i)}=\frac{1}{2}\tau_\rho\sigma^2_W[1-m^2(i)] \tag{9.9d}$$

在随机过程方法中，τ_ρ 和 σ_w 是要根据状态参数的先验信息预先给出的，这两个参数的取值对模拟结果有一定影响。根据大气日变化规律及特点，以及对大量 GPS 高程精度的分析，连续过程方差 σ^2_W 的取值应为 $1^2\sim3^2\mathrm{cm}^2/\mathrm{hour}$，随机过程的相关时间 τ_ρ 取值应为 24hours。

3)随机过程实现

设同时估计状态参数 ρ 和确定性参数 Y 的状态方程和观测方程为：

$$\rho(k)=\phi(k)\rho(k-1)+W(k) \tag{9.10a}$$

$$V(k)=A(k)Y+B(k)\rho(k)+L(k) \tag{9.10b}$$

有关随机模型为：

$$E[W(k)]=0,E[V(k)]=0 \tag{9.11a}$$

$$COV[W(k),W(j)]=\delta_{kj}D_W(k) \tag{9.11b}$$

$$COV[V(k),V(j)]=\delta_{kj}D_V(k) \tag{9.11c}$$

$$COV[W(k),V(j)]=0 \tag{9.11d}$$

$$E\left\{\begin{bmatrix}Y\\\rho(0)\end{bmatrix}\right\}=\begin{bmatrix}Y_0\\\rho_0\end{bmatrix} \tag{9.12a}$$

$$VAR\left\{\begin{bmatrix}Y_0\\\rho_0\end{bmatrix}\right\}=\begin{bmatrix}D_{Y_0}&0\\0&D_{\rho_0}\end{bmatrix} \tag{9.12b}$$

$$COV\left\{\begin{bmatrix}Y_0\\\rho_0\end{bmatrix},W(k)\right\}=0 \tag{9.12c}$$

$$COV\left\{\begin{bmatrix} Y_0 \\ \rho_0 \end{bmatrix}, V(k)\right\} = 0 \tag{9.12d}$$

根据最小二乘原理,具有先验期望和方差的初值可以用虚拟观测值来表示：

$$\begin{bmatrix} V_Y \\ V_{\rho_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Y \\ \rho_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_0 \\ \rho_0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} D_{Y_0}^{-1} & 0 \\ 0 & D_{\rho_0}^{-1} \end{bmatrix} \tag{9.13}$$

同时,状态方程的噪声可以看成是某种观测值向量。因此有：

$$V(k) = \phi(k)\rho(k-1) - \rho(k), D_{W(k)}^{-1} \tag{9.14}$$

综上所述,式(9.10)的滤波问题与如下广义最小二乘问题等价：

$$\begin{bmatrix} V_Y \\ V_{\rho_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Y \\ \rho_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_0 \\ \rho_0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} P_Y & 0 \\ 0 & P_{\rho_0} \end{bmatrix} \tag{9.15a}$$

$$V_\rho(k) = \phi(k)\rho(k-1) - \rho(k), P_W(k) \tag{9.15b}$$

$$V(k) = A(k)Y + B(k)\rho(k) + L(k), P_V(k) \tag{9.15c}$$

在最小二乘法则：

$$V_Y^T P_Y V_Y + V_{\rho_0}^T P_{\rho_0} V_{\rho_0} + \sum_{k=1}^{n} V_\rho^T(k) P_w(k) V_\rho(k) + \sum_{k=1}^{n} V^T(k) P_V(k) V(k) = \min \tag{9.16}$$

条件下,可求解出确定性参数 Y 和状态参数 $\rho(k)$ 的最优估值。但法方程阶数随历元数增加而成倍增大。因此,应考虑在新的状态参数出现之前消去原来的状态参数,以保证法方程阶数不变。

(4)随机过程的分段线性方法

随机过程方法是每个观测历元上都设有一个状态未知数,未知参数太多会影响解的可靠度。事实上,在相邻观测历元之间对流层折射的湿分量改正变化是不大的。因此,我们可以考虑每隔一定的历元间隔 k 取一个状态未知数,并假定在这两个观测历元之间的历元上,测站天顶方向的对流层折射随时间线性变化。设相近两个状态未知数为 $\rho(i)$ 和 $\rho(i+k)$,则分段线性方法的状态方程为：

$$\rho(i+k) = m(k\cdot\Delta t)\rho(i) + \overline{W}(i) \tag{9.17a}$$

$$m(k\Delta t) = e^{-\frac{t_{i+k}-t_i}{\tau_\rho}} = e^{\frac{k\Delta t}{\tau_\rho}} \tag{9.17b}$$

$$\overline{W}(i) = \int_{t_i}^{-t_{i+k}} e^{\frac{t_{i+k}-\tau}{\tau_\rho}} \cdot W(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{9.17c}$$

$$\sigma_{w(i)}^2 = \frac{1}{2}\tau_\rho \cdot \sigma_w^2 \cdot [1 - m^2(k\Delta t)] \tag{9.17d}$$

式中：Δt 为观测历元的时间间隔。

$\rho(i)$ 和 $\rho(i+k)$ 作为平差时的未知数,很显然,此时的未知参数个数已明显减少。在状态方程转化为相应的观测方程以后,可以用未知数先验权方式预先计算出来并加入到法方程中去。此外,又由于假设在 i 和 $i+k$ 之间的观测历元上,测站天顶方向的对流层折射随时间线性变化,因此有：

$$\rho(j) = \rho(i) + \frac{j-i}{k}[\rho(i+k) - \rho(i)] \qquad i \leqslant j < i+k \tag{9.18}$$

将 $\rho(j)$ 代入相应的观测方程,就可以得到以 $\rho(i)$ 和 $\rho(i+k)$ 为未知数的法方程。

实质上,分段线性方法是随机过程的近似(或简化),它也包含了单参数方法。从理论上

讲，参数越多，模拟对流层折射的影响就越准确，反映出折射估值随时间的变化也越细致，但参数过多，会影响解的强度，甚至导致法方程病态，同时也给软件设计带来困难。另一方面，参数太少，则不足以反映出对流层特别是其中的湿分量部分随时间变化的特征，从而得不出很高的精度。因此，选择适当的参数个数（即决定每隔多长时间间隔附加一个参数）是分段线性方法的关键，即 k 的选择要保证：在 $k\Delta t$ 的短时间区间内线性关系应具有一定的精度。

(5)实例分析

1)基线分量的重复性

基线分量的重复性反映了单天解之间的内符合精度，是 GPS 相对定位结果的重要质量指标之一，其定义为：

$$R=\left[\frac{\frac{n}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\frac{(c_i-\bar{c})^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sigma_i^2}}\right]^{1/2} \tag{9.19}$$

式中：c_i、σ_i^2——分别为单天解基线分量及相应分量的方差；

$\bar{c}$——相应基线分量 n 个单天解的加权平均值。

2)不同对流层折射模拟方法结果比较

A 级网是 1992 年 IGS 会战期间由中国资源卫星应用中心、国家测绘局等多个部门协调合作下组织的一次全国性 GPS 精密会战。在 A 级网中，选取 6 个测站（长春、上海、武汉、昆明、乌鲁木齐、拉萨）6 天（每天 24h 观测）的观测数据，用不同的对流层折射估计方法进行相对定位，以分析比较各种方法的精度。

图 9.2 为长春至其它 5 点共 5 条基线，分别采用单参数法、12 个状态参数（即每 2h 设置 1 个参数）的分段线性方法和随机过程方法得到的基线分量重复性直方图，每幅图从左到右有 3 个子图，分别代表南北、东西和垂直方向的重复性，每个子图又有 3 个直方图分别表示 3 种方案的结果。

从图 9.2 中可看出，采用分段线性方法和随机过程方法比采用单参数方法在垂直方向的重复性上有明显的改善，在南北方向和东西方向重复性上也稍有改善。随机过程方法和分段线性方法可以把垂直方向重复性提高到与东西方向接近的水平，约为 $10\text{mm}+1\times10^{-8}$。

3)不同方法的对流层折射估值分析

图 9.3 给出了使用上述三种方法求出的长春站天顶方向的对流层折射量。分段线性方法和随机过程方法模拟出的折射估值随时间变化的趋势基本上一致，由于单参数方法不能正确反映对流层折射随时间的变化，因此，单参数方法对应的基线分量重复性较另两种方法要差。

4)分段线性方法各方案结果比较

下面以一个中等长度基线（约为 100～300km）构成的 GPS 网为例，介绍利用分段线性方法来模拟对流层折射影响的效果。讨论应用分段线性方法时，如何选择适当的参数方能获得较满意的精度。

对 1995 年中国某省 GPS 变形监测网，我们取其中 6 个测站上 6 天的观测数据（每天观测 16h）来进行数据处理试验研究。对流层折射影响在采用相同模型改正的基础上，再用分段线性方法附加未知参数来模拟。取 $\tau_p=24\text{h}$，$\sigma_w^2=2^2\text{cm}^2/\text{hour}$，特设计以下 6 种方案进行比较：

①每 1 个测站附加 1 个天顶方向折射参数（相当于单参数法）；

②每 8h 附加 1 个状态未知数，即每个测站取 2 个参数；

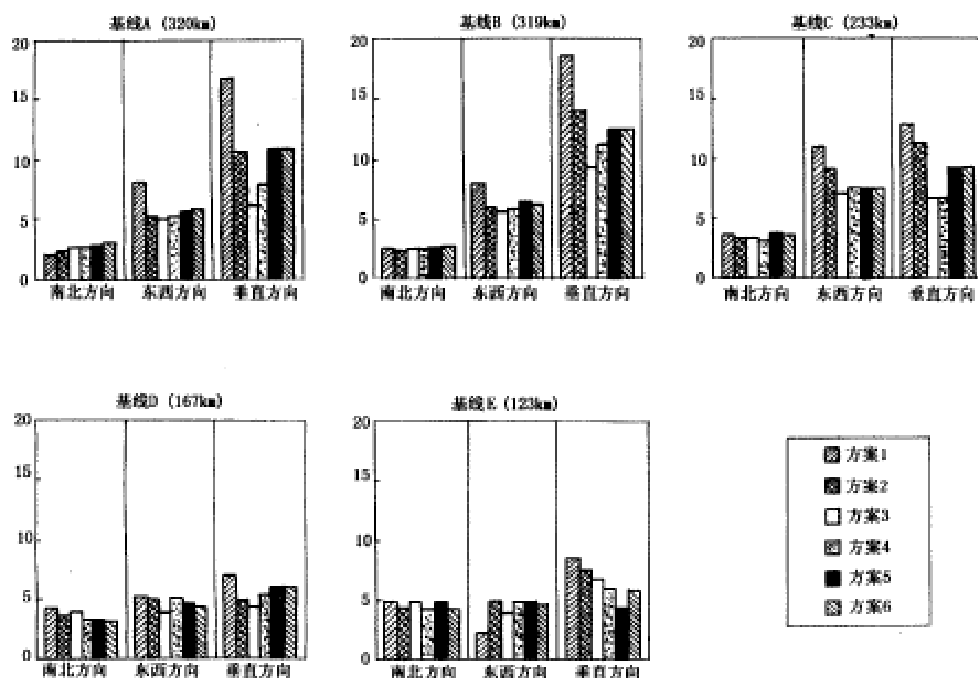


图 9.4　分段线性方法的不同方案重复性比较

要比第 1 种方案好。在我们关心的垂直方向上，第 3 种及第 4 种方案的重复性较其它方案要好一些，第 3 种方案效果尤为明显。例如，基线 A，第 1 种方案在垂直方向上的重复性为 17mm，但第 3 种方案（每 4h 取 1 个参数）在垂直方向上的重复性仅为 6mm。

为了进一步了解 6 种方案对垂直方向重复性的影响，表 9.1 中列出了各种方案的对流层折射参数个数、求解的总参数个数和用相应方案算出的 15 条基线垂直方向的重复性。从表 9.1 中可看出，第 3 种和第 4 种方案效果好。从 6 种方案的比较可知，对流层折射参数设置得

分段线性方法各方案的垂直方向重复性　　表 9.1

序号	对流层折射参数个数	求解的总参数	垂直方向上的重复性
方案 1	6	218	$7.7\text{mm}+2.3\times10^{-8}$
方案 2	12	224	$7.5\text{mm}+1.1\times10^{-8}$
方案 3	24	236	$5.4\text{mm}+0.3\times10^{-8}$
方案 4	48	260	$5.6\text{mm}+0.5\times10^{-8}$
方案 5	96	308	$6.9\text{mm}+1.7\times10^{-8}$
方案 6	192	404	$7.2\text{mm}+1.7\times10^{-8}$

太少或太多，对提高垂直方向精度的效果都不好，因为参数太少，不足以反映对流层折射影响的随机性，但参数太多，则影响解的强度和稳定性，从而也降低了解的精度。因此，对流层折射参数以每 2h 或每 4h 取 1 个参数为好。事实上，从气象条件的变化也可说明每 2h 或每 4h 设置 1 个参数比较合理。一般情况下，气象条件在 30～60 分钟的变化不会很大，因此，每 0.5h 或每

1h 设置 1 个参数作用不是很大，而会造成参数过度，影响解的精度。每隔 2 小时气象条件一般会有较大的变化，每 2h 设置 1 个参数基本上能反映出气象条件的变化情况，相对而言，每 4h 设置 1 个参数又不能非常准确地反映出气象条件的变化情况，理论上讲，每 2h 设置 1 个参数的效果应该是最佳的。本例之所以第 3 种方案（每 4h 设置 1 个参数）效果最好，是因为观测时天气多为阴天，气象条件的变化不大。

9.4 GPS 高程转换方法概述

由 GPS 相对定位的基线向量，可以得到高精度的大地高差。GPS 测量所提供的高程成果为相对于某一参考椭球面的大地高，记为 H_{GPS}。我国在实际工程应用中，采用以似大地水准面为基准的正常高(normal height)高程系统，记为 H_{Nor}。两者的关系为：

$$\xi = H_{GPS} - H_{Nor} \tag{9.20}$$

式中：ξ——A 点的高程异常(见图 9.1)。

由式(9.20)可很清楚地看出，如果知道某点的高程异常值 ξ，则可很方便地将该点的 GPS 高程(大地高)转化为正常高高程。目前，GPS 高程转换方法一般有以下几种。

(1)用地球重力场模型直接求 ξ

高程异常是地球重力场的参数，利用地球重力场模型，根据点位信息，直接可求得该点的高程异常值。具体地说，地面点的高程异常是根据重力场长波分量、已知点大地水准面差距、斯托克斯方程数字积分的长波分量的球谐函数表达式和地面重力测量结果等来计算的。在一定区域内，只要有足够数量的重力测量数据，就可以比较精确地求定该区域的高程异常值。

高程异常 ξ 的精度取决于已知的局部重力场的精度、该区域地面重力测量结果的密度和精度以及在已知重力点之间插求重力时所用的高程数据的精度等。对于实施水准测量比较困难的丘陵和山区，利用重力测量方法是比较实用且可靠的方法。目前，在我国现已布设重力测网的绝大部分区域，用此方法一般可达到厘米级的精度。但此法的缺点是需要足够多且精度足够高的重力测量资料，而且由此计算的 ξ 结果精度不高。由于我国缺乏精确的重力资料，用此法求得的地面点的高程异常 ξ 精度较低，不能满足工程的精度要求。

(2)数学模型拟合法

该法的主要思路是将部分 GPS 点布设在高程已知的水准点上，或通过水准联测求得部分 GPS 点的正常高高程，使得这些点同时具有 H_{GPS} 和 H_{Nor}。在某一区域内，如果有一定数量的已知点(GPS 大地高和正常高均已知)，则已知点的高程异常值就可根据式(9.20)计算得到。然后，再用一个函数来模拟该区域的似大地水准面的高度，这样就可以用数学内插的方法求解区域内任意一点的高程异常 ξ 值。此时，如果在区域内某点上通过 GPS 测量得到了 H_{GPS}，我们可以用模拟好的数学模型求解该点的 ξ，进而求得该点的正常高。根据数学模型的不同，又有加权平均法、多面函数法、曲面拟合法等方法。

①加权平均法

所谓加权平均法，就是由内插点周围部分已知点的高程异常加权平均求得该点的高程异常。设在内插点周围选 n 个已知点，高程异常为 $\xi_i(i=1,2,\cdots,n)$，对应的权为 P_i，则内插点 j 的高程异常为：

$$\xi_j = \frac{[P\xi]}{[P]} \tag{9.21}$$

式中：$[P\xi] = \sum_{i=1}^{n}(P_i\xi_i)$，$[P] = \sum_{i=1}^{n}P_i$。

式(9.21)中的权 P_i 可根据已知点至内插点的水平距离来计算：

$$P_i = \frac{1}{(d_i + \varepsilon)^2} \tag{9.22}$$

式中：d_i——已知点 i 至内插点 j 的水平距离；

ε——小正数，以防止权函数的分母趋于 0，通常 ε 取 0.01，单位与 d_i 单位相同。

当已知点离内插点较近时，P_i 就大，对内插点贡献大，当已知点离内插点较远时，P_i 就小，从而对内插点贡献小。此法要求各 P_i 不要相差过大。

②多面函数法

多面函数法是由美国的 Hardy 提出的。其基本思想是，任何数学表面和任何不规则的圆滑表面，总可用一系列有规则的数学表面的总和以任意精度逼近，其方程为：

$$\xi(x, y) = \sum_{i=1}^{n}\alpha_i Q(x, y, x_i, y_i) \tag{9.23}$$

式中：α_i——待定参数；

$Q(x, y, x_i, y_i)$——x 和 y 的二次核函数。

常用的二次核函数为：

$$Q(x, y, x_i, y_i) = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + d^2]^k \tag{9.24}$$

式中：d——任意常数，称为光滑因子；

K——取 1/2 时为正双曲线，K 取 -1/2 时为倒双曲函数。

这种方法的 n 个已知点，要求是高程异常显著点。

③曲面拟合法

该法的主要思路是利用 n 个已知点（高程异常值已知），用一个平面或二次曲面的数学模型来拟合高程异常。

平面拟合的方程为：

$$\xi(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \tag{9.25}$$

式中：(x, y)——点的平面坐标；

a_i——模型系数。

若采用二次曲面，则方程为：

$$\xi(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \tag{9.26}$$

对于平面拟合，区域已知点个数应不少于 3 个，对于二次曲面拟合，已知点不少于 6 个。一般来说，若已知点个数足够多，则二次曲面拟合的精度要高于平面拟合的精度。

在平原地区，似大地水准面的变化是非常平缓的。在 15km^2 范围内，一般只有 0.1～0.2m 的起伏。如果同时具有 H_{GPS} 和 H_{Nor} 的点能保证 4～6km 一点的密度，则用二次曲面法拟合的高程异常精度一般可达到毫米级。

(3)数学模型抗差估计法

若观测数据服从正态分布，且无显著异常干扰，则采用最小二乘拟合法即可获得可靠的拟合函数。但当数据点受异常污染时，基于最小二乘原则进行的各种拟合，都将在残差二次型等

于极小的原则下，过分迁就这些异常数据，导致拟合函数失真。在数学模型拟合法（如二次曲面拟合法）的基础上，根据平差后的验后信息，逐步调整观测值（已知点）的权，使含有粗差的观测值的权越来越小甚至等于0，从而减小粗差对平差结果的影响。在某种意义上说，当观测值的权很小或者等于0时，也就相当于从观测序列中剔除了该观测值。因此在迭代的过程中，逐步发现粗差并将其“剔除”。

(4)数学模型优化方法

由于测量中诸多因素的影响，使有些点实测高程异常值含有粗差；建模前，对异常数据的判定和剔除是确保模型质量的重要步骤；对参与建模的点进行显著性判断也是十分必要的；把建模作用显著的点纳入高程异常模型，而不必把全部已知点纳入模型建立中，以达到模型优化的目的，从一些工程实例的应用情况来看，效果非常明显。

(5)神经网络方法

人工神经网络是一门新兴交叉科学，它是生物神经系统的一种高度简化后的近似。从20世纪80年代以来，许多领域（包括工程界）的科学家掀起了研究人工神经元网络的新高潮，现已取得了不少突破性进展。基于神经网络转换GPS高程是一种自适应的映射方法，没作假设，能减少模型误差。

但以上诸多方法各自都存在一些缺点，因此，如何来进行GPS高程转换，且保持高精度，确实仍需不断研究。

9.5 GPS高程转换的二次曲面拟合法

众多实例及研究表明，采用二次曲面拟合法来转换GPS高程，能取得比较理想的结果。

(1)计算模型

由地球重力场理论可知，大地水准面外部的实际重力位 W，可分解为正常重力位 U 和异常位（扰动位）T，即

$$T = W - U \tag{9.27}$$

相应于似大地水准面，由布隆斯公式知

$$\xi = T/\gamma \tag{9.28}$$

式中：γ——正常重力。

在一定范围内，大地水准面比较平缓，扰动位可看作是平面坐标 x、y 的函数：$T = T(x, y)$，把其展开成：

$$T(x,y) = T_0 + \frac{\partial T_0}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial T_0}{\partial y}\Delta y + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2}\Delta x^2 + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 T_0}{\partial y^2}\Delta y^2 + \frac{\partial^2 T_0}{\partial x \partial y}\Delta x \Delta y + \varepsilon \tag{9.29}$$

式中：T_0——参考点的扰动位。

由参考点的垂线偏差和垂线偏差变化率关系式并顾及在小范围内正常重力变化可以忽略不计，则：

$$\zeta = A_0 + \zeta_0 \Delta x + \eta_0 \Delta y + \frac{1}{2}\zeta'_0 \Delta x^2 + \frac{1}{2}\eta'_0 \Delta y^2 + \theta'_0 \Delta x \Delta y + \varepsilon \tag{9.30}$$

可表达为：

$$\zeta(x,y) = a_0 + a_1 \Delta x + a_2 \Delta y + a_3 \Delta x^2 + a_4 \Delta x \Delta y + a_5 \Delta y^2 + \varepsilon \tag{9.31a}$$

$$\Delta x = x - x_0 \tag{9.31b}$$

$$\Delta y = y - y_0 \tag{9.31c}$$

式中：x_0、y_0——参考点坐标，一般取为重心坐标。

设某 GPS 水准联测点 P_i，其拟合残差为 v_i，则有：

$$v_i = a_0 + a_1\Delta x_i + a_2\Delta y_i + a_3\Delta x_i^2 + a_4\Delta x_i\Delta y_i + a_5\Delta y_i^2 - \zeta_i \tag{9.32}$$

若有 n 个已知点，其构成的误差方程式为：

$$V = B \cdot X - \xi \tag{9.33}$$

式中：

$$\underset{n\times 1}{V} = [v_1 \quad v_2 \quad \cdots \quad v_n]^T \tag{9.34a}$$

$$\underset{6\times 1}{X} = [a_0 \quad a_1 \quad \cdots \quad a_5]^T \tag{9.34b}$$

$$\underset{n\times 1}{\xi} = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_n]^T \tag{9.34c}$$

$$\underset{n\times b}{B} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta x_1 & \Delta y_1 & \Delta x_1^2 & \Delta x_1\Delta y_1 & \Delta y_1^2 \\ 1 & \Delta x_2 & \Delta y_2 & \Delta x_2^2 & \Delta x_2\Delta y_2 & \Delta y_2^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & \Delta x_n & \Delta y_n & \Delta x_n^2 & \Delta x_n\Delta y_n & \Delta y_n^2 \end{bmatrix} \tag{9.34d}$$

按最小二乘法可求得拟合系数 X 为：

$$X = (B^T B)^{-1} \cdot B^T \cdot \xi \tag{9.35}$$

采用二次曲面拟合时，至少应有 6 个已知点。当已知点少于 6 个时，可采用平面函数拟合。在实际工作中，应根据 GPS 水准联测点的分布情况选用不同方案进行计算。

(2)抗差估计

若观测数据服从正态分布，且无显著异常干扰，则采用最小二乘拟合法即可获得可靠的拟合函数。但当数据点受异常污染时，基于最小二乘原则进行的各种拟合，都将在残差二次型等于极小的原则下，过分迁就这些异常数据，导致拟合函数失真。

抗差拟合推估法是在原最小二乘拟合推估法的基础上发展起来的一种选权迭代法。它通过验后方差估计求出观测值的验后方差，然后利用方差检验找出方差异常大的观测值。根据方差与权成反比的关系，给它一个相应小的权，进行下一步的迭代平差计算。重复以上过程，使含有粗差的观测值的权越来越小，甚至等于 0，从而使其对平差结果的影响很小。在某种意义上说，当观测值的权很小或者等于 0 时，也就相当于从观测序列中剔除了该观测值。因此在迭代的过程中，逐步发现粗差并将其"剔除"。

对于 GPS 高程拟合推估，具体的计算步骤是，首先进行最小二乘平差，即一般的 GPS 高程拟合法。这时取初权 $p_i = 1$，然后进行验后方差估计：

$$\hat{\sigma}_i^2 = v_i^2 / r_i \tag{9.36a}$$

$$r_i = (Q_{vv}P)_{ii} \tag{9.36b}$$

式中：r_i——多余观测分量。

根据验后方差计算等价权，计算等价权的方法很多，如 Huber 函数：

$$p'_i = p_i \qquad |v_i/\sigma_0| \leqslant c_0 \tag{9.37a}$$

$$p'_i = p_i c_0 / |v_i/\sigma_0| \qquad |v_i/\sigma_0| > c_0 \tag{9.37b}$$

式中：c_0 一般取 1.5～2.0；σ_0 为单位权中误差。

在新权下，重新平差，可得：

$$X = (B^{T}P'B)^{-1} \cdot B^{T} \cdot P' \cdot \xi \tag{9.38}$$

重复以上步骤，随着迭代次数的增加，若某观测值的权变得越来越小，说明这一观测值含有粗差，或者与其它观测值不相容，不能纳入已知点列用于计算拟合函数系数。当权降低到很小时，其对平差结果的影响也就很小，甚至没有影响，从而使计算结果抗差化。

(3)数据诊断与模型优化

设高程异常拟合模型的表达式为：

$$V = B \cdot X - \xi \tag{9.39}$$

按最小二乘法可求得拟合系数 X 为：

$$X = (B^{T}B)^{-1} \cdot B^{T} \cdot \xi \tag{9.40}$$

现剔除第 i 组数据，仍可按式(9.40)求得拟合系数 X，为区别起见，在此记为 $X(i)$，则第 i 组数据对参数的影响值为：

$$F_{i} = X(i) - X \tag{9.41}$$

构成检验距离：

$$D_{i,1}(M,C) = \frac{F_{i}^{T}MF_{i}}{C} \tag{9.42}$$

若取 $M = A^{T}A$，$C = 1$ 则得：

$$D_{i,1}(A^{T}A,1) = r_{i}^{2}\frac{h_{ii}}{1-h_{ii}}\hat{\sigma}^{2} \tag{9.43}$$

式中：$H = A^{T}N^{-1}A$，且 $N = A^{T}A$，$r_{i}^{2} = \dfrac{v_{i}^{2}}{\hat{\sigma}^{2}(1-h_{ii})}$

取置信水平 α，可推得 $D_{i,1}$ 的临界值为：

$$D_{i,1}(\alpha) = (n-p)\frac{h_{ii}(\alpha)}{1-h_{ii}(\alpha)}\beta_{\alpha}\left(\frac{1}{2},\frac{n-p-1}{2}\right) \tag{9.44}$$

若 $D_{i,1} > D_{i,1}(\alpha)$，则认为该组数据对所建模型有显著影响。剔除影响不显著的点，使模型得到优化。

(4)异常观测值的检验

以有限控制点拟合高程异常模型，为确保建立模型的精度和质量，应该剔除含有异常观测值的点。以免含有粗差的数据纳入建模中，避免模型失真。

高程异常模型拟合时，为使水准测量的工作量有较显著的减小，发挥 GPS 水准的优势，宜采用较少的点参与模型的拟合。通常而言，异常观测值的点是很少的，若方差 σ^{2} 未知，以标准化残差 r_{i} 利用 β 检验探求粗差点，是一种较严密的方法。

$$\frac{r_{i}^{2}}{n-p} \sim \beta\left(\frac{1}{2},\frac{n-p-1}{2}\right) \tag{9.45}$$

取置信水平 α，则 $\beta > \beta_{(\alpha)}$ 时，可以认为该观测值异常，应该剔除，拒绝其参与建模。

9.6 GPS 高程转换的神经网络方法

9.6.1 神经网络发展概述

神经网络的工程应用已经得到了很大发展。人类对人工神经网络的研究已有半个多世纪

的历史了，但它的发展是不平衡的。以时间为序，它的研究大体可分为四个阶段。

(1)早期阶段

人工神经系统的研究可以追溯到1800年Frude的前精神、分析学时期，他已经做了一些初步工作。1913年Rrssell进行了人工神经系统的第一实践：水力装置。1943年，美国心理学家McCulloch和数学家Pitts合作提出形式神经元的数学模型，简称为MP模型，以此开创了神经科学理论研究的时代。1944年，心理学家Hebb提出了改变神经元连接强度的Hebb学习规则。Hebb规则至今仍在各种神经网络模型中起着重要作用。

作为人工智能的网络系统的研究则是在20世纪50年代末60年代初开始的。1957年，Rosenblatt首次提出并设计制作了著名的感知器(Perceptron)，它可模拟动物和人脑的感知和学习能力。感知器的出现使神经网络从理论研究转人工程实现阶段，掀起了研究人工神经元网络的高潮。1962年，Widrow和Hoff提出了自适应线性元件网络Adaline。这与当时占主导地位的以顺序离散符号推理为基本特征的AI(人工智能)途径完全不同，因而引起了不少人的兴趣，同时也引起了很大的争议。

1969年，人工智能的创始人之一Minsky和Papert在经过多年的深入分析和研究之后，出版了颇有影响的《Perceptron》一书。他们的结论是悲观的。由于Minsky在学术界的地位和影响，故其后若干年内，这一研究处于低潮。1981年，Minsky自己也承认当时的论点对这一研究的伤害过大。

(2)过渡阶段

进人20世纪70年代后，虽然神经网络研究相对处于低潮时期，但仍有不少科学家在极端困难的条件下致力于这一研究，提出了各种不同的网络模型，如，1970年，Grossberg等提出了自适应共振理论；1971年，芬兰的Kohonen提出了自组织映射；1973年，Fukushima提出了神经认知机网络理论；1974年，Webos提出了BP学习理论；1977年，Ankson、Silvetstein等人提出了盒中脑BSB(Brain－state－in－a－box)模型。

(3)高潮阶段

神经网络研究第二次高潮到来的标志和揭开神经网络计算机研制的序幕的是美国加州工学院物理学家Hopfield提出的HNN(Hopfield Neural Network)模型。HNN模型的提出有力地推动了神经网络的研究。Feldmann和Ballard的连接网络模型给出了并行分布处理(PDP：Parallel Distributed Processing)的计算原则；1985年，Sejnowski和Hinton提出了Boltzman机模型；认知心理学家Rumelbart和McClelland等人提出了PDP理论，同时发展了多层网络的BP(Back Propagation)算法——反向传播学习算法，把学习的结果反馈到中间层次的隐单元，改变它们的权系矩阵，从而达到预期的学习目的，它是迄今为止应用最广泛的网络。实践证明，BP网络有很强的运算能力，可以解决很多具体问题，例如用于语言综合、模型分类和识别以及自适应控制等。

(4)平稳阶段

1987年6月21日在美国圣地亚哥召开了第一届国际神经网络学术会议，宣告了国际神经网络协会正式成立。在这之后，每年都要召开神经网络和神经计算机的国际性和地区性会议，以促进神经网络的研制、开发和应用。从国际神经网络会议发表的论文来看，神经网络研究已进人相对平稳发展时期，有关应用的论文占了总数的近30%。

确实，神经网络理论的应用已经渗透到各个领域，并在智能控制、模式识别、计算机视觉、自适应滤波和信号处理、非线性优化、自动目标识别、连续语音识别、声纳信号的处理、知识处理、传感技术与机器人、生物医学工程等方面取得了令人鼓舞的进展。

目前，测绘界已有不少学者在研究采用神经网络方法进行 GPS 高程转换，取得了一些有益的结论。

9.6.2 神经网络的基本原理

(1)人工神经元网络的基本概念

人的大脑是自然界所造就的最高级产物。人的思维是由人脑来完成的，思维是人类智能的集中体现。人的思维主要概括为逻辑思维和形象思维两种。以规则为基础的知识系统可被认为是致力于模拟人的逻辑思维，而人工神经元网络则被认为是探索人的形象思维，前者由左脑主管，后者则由右脑主管。人脑是由大约 10^{11} 数量的神经元和 $10^{14} \sim 10^{15}$ 个突触组成的巨大系统。

人工神经元网络是生理学上的真实人脑神经网络的结构和功能，以及若干基本特性的某种理论抽象、简化和模拟而构成的一种信息处理系统。据现在的了解，大脑的学习过程就是神经元之间连接强度随外部激励信息做自适应变化的过程，大脑处理信息的结果确由神经元的状态表现出来。显然，神经元是信息处理系统的最小单元。神经元的基本结构如图 9.5 所示。

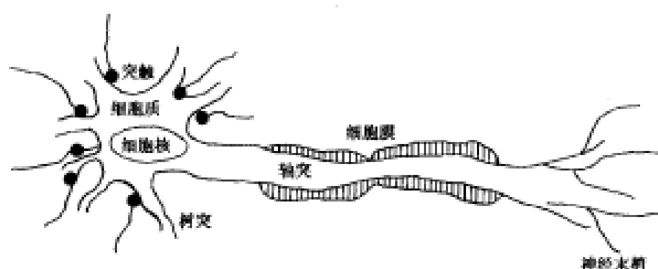


图 9.5 神经元结构示意图

神经元(即神经细胞)是由细胞体、树突、轴突和突触四部分组成。每个细胞体都有一个细胞核在进行着呼吸和新陈代谢等许多生化过程。神经元的树突较短，分支很多，是信息的输入端。轴突较长，是信息的输出端。突触是一个神经元与另一个神经元相联系的特殊结构部位。树突和轴突一一对接，从而靠突触把众多的神经元连成一个神经元网络。各神经元之间的连接强度和极性可以有所不同，并且都可进行调整，因此，人脑才可以有存储信息的功能。

(2)简化的神经元数学模型

人工神经元的结构模型如图 9.6 所示。图中，$x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为输入信号，μ_i 为神经元内部状态，θ_i 为阈值。设 W_{ij} 为 μ_i 到 μ_j 连接的权值，$f(x)$ 为激发函数，y_i 为输出，则上述模型可以描述为：

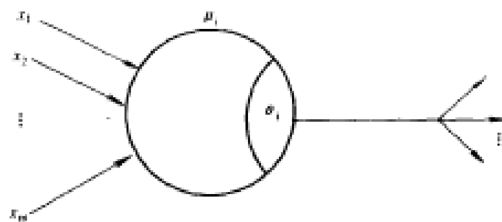


图 9.6 神经元结构的数学模型

$$\sigma_i = \sum_j w_{ij} x_j - \theta_i \tag{9.46}$$

$$\mu_i = g(\sigma_i) \tag{9.47}$$

$$y_i = h(u_i) = f(\sigma_i) = f(\sum_j w_{ij} x_j - \theta_i) \tag{9.48}$$

$$f = h \times g \tag{9.49}$$

每一个神经元的输入接受前一级神经元的输出，因此，对神经元 i 的总作用 σ_i 为所有输入的加权之和减去阈值，此作用引起神经元 i 的状态变化，而神经元 i 的输出 y_i 为其当前状态 σ_i 的函数。

9.6.3 神经网络 BP 算法

(1)BP 网络算法的思路

Minsky 和 Papert 在 1969 年出版的《Perceptron》书中的论点曾使许多人对神经网络的研究失去了信心，但仍有许多学者坚持这一方向的研究。Rumelhart、McClelland 和他们的同事们于 1985 年发展了 BP 网络学习算法，实现了 Minsky 的多层网络设想。其实，早在 1974 年，Webos 就在他的论文中提出了 BP 学习理论。

BP 网络不仅有输入层节点，输出层节点，而且有隐含层节点(隐层可以是一层或多层)如图 9.7 所示。对于输入信号，要先向前传播到隐节点，经过激活函数后，再把隐节点的输出信息传播到输出节点，最后给出输出结果。节点的激活函数通常选取标准 Sigmoid 型函数：

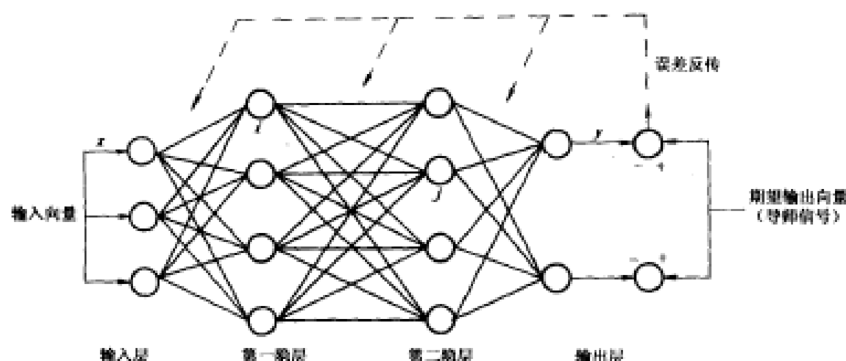


图 9.7 BP 网络模型结构

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{9.50}$$

BP 算法的主要思想是把学习过程分为两个阶段：

第一阶段(正向传播过程)：给出输入信息通过输入层经隐含层逐层处理并计算每个单元的实际输出值。

第二阶段(反向传播过程)：若在输出层未能得到期望的输出值，则逐层递归地计算实际输出与期望输出之差值(即误差)，以便根据此差调节权值。具体地说，就是可对每一个权重计算出接收单元的误差值与发送单元的激活值的积。因为这个积和误差对权重的(负)微商成正比(又称梯度下降算法)，把它称作权重误差微商。权重的实际改变可由权重误差微商按各个模式分别计算出来。

这两个过程的反复运用，使得误差信号最小。实际上，误差达到人们所希望的要求时，网络的学习过程就告结束。

(2)BP算法的数学描述

BP算法是在导师指导下，适合于多层神经元网络的一种学习，它是建立在梯度下降法的基础上的。

设含有共 L 层和 N 个节点(或称单元)的一个任意网络，每层单元只接受前一层的输出信息并输出给下一层各单元，各节点的特性为Sigmoid型函数(连续可微函数)。设给定 S 个样本 $(x_k, y_k)(k=1,2,\cdots,s)$，任一节点 i 的输出为 O_i，对某一个样本 k，其输入向量为 x_k(n 维)，网络的输出向量为 y_k(m 维)。现在研究第 l 层的第 j 个单元，当输入第 k 个样本时，节点 j 的输入值为：

$$I_{jk}^{l} = \sum_{i=1}^{n_1} w_{ji} O_{ik}^{l-1} \tag{9.51}$$

式中：k——样本序号；

l、$(l-1)$——网络层号；

i——对应于节点 j 的前一层的某一个节点(该层总节点数为 n_1)；

O_{ik}——节点 i 的输出值；

w_{ji}——从节点 i 到节点 j 的连接权值。

节点 j 的输出值为：

$$O_{jk}^{l} = f(I_{jk}^{l}) \tag{9.52}$$

式中：I_{jk}^{l}——节点 j 的输入信息；

$f(x)$——节点 j 的激活函数。

反向传播时，定义网络的期望输出 y_k 与实际输出 y_k' 的误差平方和为目标函数：

$$E_k = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}(y_k - y_k')^2 \tag{9.53}$$

总误差为：

$$E = \frac{1}{2S}\sum_{k=1}^{S} E_k \tag{9.54}$$

这样，网络的学习问题就等价于无约束最优化问题：

$$E(w) = \min \tag{9.55}$$

通过调整权值 w，使总误差 E 极小。

权值调整公式为：

$$w_{ji} = w_{ji} - \mu \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \qquad \mu > 0 \tag{9.56}$$

式中：μ——步长；

$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = \sum_{k=1}^{S} \frac{\partial E_k}{\partial_{wji}}$；

S——样本个数。

定义：

$$\delta_{jk}^{l} = \frac{\partial E_k}{\partial I_{jk}^{l}} \tag{9.57}$$

于是：

$$\frac{\partial E_k}{\partial w_{ji}}=\frac{\partial E_k}{\partial I_{jk}^l}\cdot\frac{\partial I_{jk}^l}{\partial w_{ji}}=\frac{\partial E_k}{\partial I_{jk}^l}\cdot O_{ik}^{l-1}=\delta_{jk}^l\cdot O_{ik}^{l-1} \tag{9.58}$$

下面分两种情况来讨论 δ_{jk}^l。

第一种情况，若节点 j 为输出单元，则 $O_{jk}^l=y'_k$。为讨论方便，设网络只有一个输出单元，有：

$$\delta_{jk}^l=\frac{\partial E_k}{\partial I_{jk}^l}=\frac{\partial E}{\partial y'_k}\cdot\frac{\partial y'_k}{\partial I_{jk}^l}=-(y_k-y'_k)\cdot f'(I_{jk}^l) \tag{9.59}$$

第二种情况，若 j 不是输出单元，则

$$\delta_{jk}^l=\frac{\partial E_k}{\partial I_{jk}^l}=\frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}^l}\cdot\frac{\partial O_{jk}^l}{\partial I_{jk}^l}=\frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}^l}\cdot f'(I_{jk}^l) \tag{9.60}$$

式中 O_{jk}^l是传送到下一层$(l+1)$层的输入，计算 $\frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}^l}$ 要从$(l+1)$层算回来。

设$(l+1)$层共有 m_1 个单元$(p=1,2,\cdots m_1)$，则：

$$\frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}^l}=\sum_{p=1}^{m_1}\left(\frac{\partial E_k}{\partial I_{pk}^{l+1}}\cdot\frac{\partial I_{pk}^{l+1}}{\partial O_{jk}^l}\right)=\sum_{p=1}^{m_1}\left(\frac{\partial E_k}{\partial I_{pk}^{l+1}}\cdot w_{pj}\right)=\sum_{p=1}^{m_1}(\delta_{pk}^{l+1}\cdot w_{pj}) \tag{9.61}$$

将式(9.61)代入到式(9.60)，可得：

$$\delta_{jk}^l=\sum_{p=1}^{m_1}(\delta_{pk}^{l+1}\cdot w_{pj})\cdot f'(I_{jk}^l) \tag{9.62}$$

如果采用式(9.50)的标准 Sigmoid 函数，由于其导数：

$$f'(x)=\frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x}=f(x)\cdot[1-f(x)] \tag{9.63}$$

将式(9.63)分别代人式(9.59)和式(9.62)，得到：

$$\delta_{jk}^l=-(y_k-y_k')\cdot f(x)\cdot[1-f(x)] \tag{9.64}$$

$$\delta_{jk}^l=\sum_{p=1}^{m_1}(\delta_{pk}^{l+1}\cdot w_{pj})\cdot f(x)\cdot[1-f(x)] \tag{9.65}$$

现在，反向传播算法的步骤可概括如下：

1)选定权系数初值 $w_{ji}(O)$；

2)重复下述过程直至收敛(样本从 $k=1$ 到 $k=S$)：

①正向过程计算：从输入节点开始向前逐层计算各节点的输入值 I_{jk}^l和输出值 O_{jk}^l，直至计算出网络输出值 y'_k。

②反向过程计算：对每层各单元，计算 δ_{jk}^l，并按下式修正权值：

$$w_{ji}(t+1)=w_{ji}(t)-\mu\cdot\frac{\partial E_k}{\partial w_{ji}} \qquad \mu>0 \tag{9.66}$$

BP算法是一个很有效的算法，许多问题都可由它来解决。BP 模型已成为神经网络的重要模型之一。

9.6.4 转换 GPS 高程的五层 BP 网络

根据工程应用的特点，我们构造了转换 GPS 高程的五层 BP 神经网络结构(见图 9.8)。网络共设五层，分别为输入转换层、输入层、隐含层、输出层和输出转换层。网络只设一个隐含层，但另外增加了一个输入数据转换层和一个输出数据转换层。增加设置这两个转换层是必要的，因为采用标准 Sigmoid 激活函数的神经网络，其标准输入、输出数据限定范围为[0,1]。而实际工程应用中的参数取值范围各异，如 GPS 高程转换中的坐标参数(X, Y)，其数值都非常大，需要将其转换为[0,1]区间内的值。另外，输出结果接近 0 或接近 1 的区域是网络的饱和区，因此，输出数据范围可设定为[0.2,0.8]或[0.1,0.9]，可避开网络的饱和区。

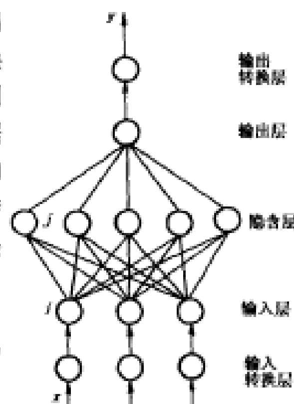


图 9.8 五层 BP 神经网络结构

输入转换层和输出转换层的计算公式因工程而异，具体应用时，应通过编程由电脑实现自动转换。

9.6.5 基于神经网络的"混合转换法"

(1)方法思路

GPS 高程转换的二次曲面拟合法(以下简称 CFM)和常规神经网络模拟法(以下简称 NNM)的特点见表 9.2。

CFM 方法与 NNM 方法优缺点比较表　　表 9.2

方 法	优 点	缺 点
CFM	1.计算简单、方便； 2.若已知点数据中含有粗差，利用抗差估计法，可减小粗差对平差结果的影响。	1.所采用的二次曲面与水准面不完全贴合； 2.拟合精度受到一定的限制。
NNM	1.并不采用某一确定的几何曲面，在一定情况下能减少几何模型误差； 2.拟合精度较高。	1.计算复杂，计算时间长； 2.初始权值对结果和收敛影响大； 3.没有发现粗差的能力。

由表 9.2 可知，CFM 和 NNM 都有优点。为充分利用两者的优点，东南大学 GPS 应用研究室构思了转换 GPS 高程的新方法——"混合转换法"，简记为 CFM&NNM。该方法的具体计算过程为：

1)假设区域共有 n 点，其中 n_1 个已知点(H_{GPS}和 H_{Nor}均已知)，则待定点(已知 H_{GPS}，待求 H_{Nor})的个数 $n_2 = n - n_1$；已知点个数最好大于等于 8；

2)根据 n_1 个已知点信息，利用二次曲面拟合法(CFM)拟合出所有 GPS 点的高程异常 ξ；

3)计算 n_1 个已知点的高程异常误差：

$$\Delta\xi = \xi_0 - \xi \tag{9.67}$$

式中：ξ_0——高程异常已知值，计算公式为：

$$\xi_0 = H_{GPS} - H_{Nor} \tag{9.68}$$

4)此时，再将上述 n_1 个已知点的所有信息构成学习集样本：

$$(x_i, y_i, \xi_i; \Delta\xi_i) \qquad i = 1,2,\cdots,n \tag{9.69}$$

其中，x、y、ξ 作为输入单元参数，$\Delta\xi$ 作为输出单元参数，用图 9.8 的（五层）BP 神经网络方法（NNM）来模拟高程异常误差 $\Delta\xi$，即利用 n_1 个学习集样本对该 BP 网络进行训练。经反复试验，隐含层节点数取 15 为佳。

5）用训练好的神经网络对 n_2 个待求点进行计算，可得各点的高程异常误差 $\Delta\xi$，从而计算出其正常高高程。

$$H_{\mathrm{Nor}} = H_{\mathrm{GPS}} - \xi_0 = H_{\mathrm{GPS}} - (\xi + \Delta\xi) \tag{9.70}$$

式中：ξ——CFM 拟合的高程异常值；

$\Delta\xi$——NNM 模拟得出的高程异常误差，故称此法为 CF&NNM。

（2）工程实例

某市 D 级 GPS 网（平坦地区，区域面积约为 300km^2）共布设 96 个观测点，其中 44 个 GPS 点（见图 9.9）进行了三等水准连测。

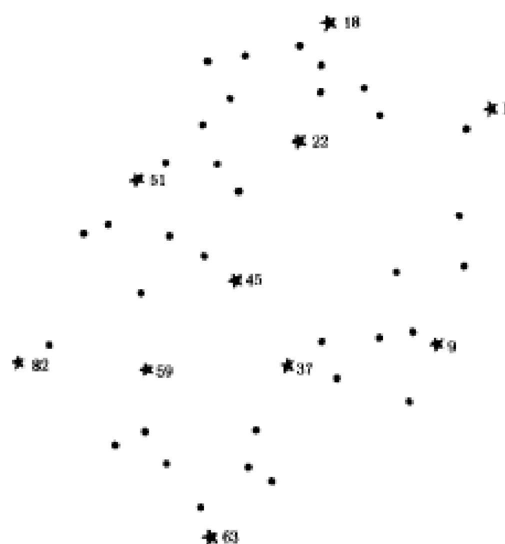


图 9.9　某市 D 级 GPS 网水准连测点位置图

用式（9.45）对上述 44 个点进行了粗差检测，发现 4 个粗差点，剔除这 4 个粗差点，用余下的 40 个点对"混合转换法"进行试验。在图 9.9 中，我们选用其中 10 个均匀分布于整个区域的点作为已知点构成样本集（或称学习集，见图 9.9 中的五星点），其他 30 个点作为测试集（或称工作集），用来检验各种方法的拟合效果。

（3）与其它方法比较分析

为便于进行分析比较，我们用 CFM、NNM 和 CF&NNM 三种方法对上例进行了模拟，并对三种方法的模拟结果进行了比较分析。

1）二次曲面拟合法（CFM）

根据最小二乘法原理，利用 10 个已知点，可求得二次曲面拟合法公式（9.31）中的待定参数 a_0，$a_1 \sim a_5$，再用该 6 个参数求得全部 40 点的高程异常，具体结果见表 9.3。

2）神经网络模拟法（NNM）

用图 9.8 的 BP 网络结构转换 GPS 高程，我们经过上千次的尝试，得出了比较理想的 BP

网络结构：输入层单元数取2(分别为x,y)、隐含层单元数取15、输出层单元数取1(为高程异常ξ)。在学习过程中，以“学习中误差”作为收敛控制参数。神经网络模拟法结果见表9.4。

二次曲面法拟合结果 表9.3

点号	高程异常偏差(mm) $\Delta\xi=\xi_0-\xi$	点号	$\Delta\xi$ (mm)	点号	$\Delta\xi$ (mm)	点号	$\Delta\xi$ (mm)
1	-1.7	14	-4.0	20	-5.7	6	-6.0
18	0.0	80	3.6	26	0.1	10	-5.3
82	3.5	31	-5.3	30	-5.7	15	-7.3
63	0.9	24	5.2	32	1.1	16	-8.5
9	0.6	48	-12.8	34	-0.7	17	-6.3
51	-3.5	69	-12.2	39	-9.3	62	-11.4
45	5.1	11	2.9	50	2.8	64	-6.9
37	-1.3	33	-2.1	52	-6.3	65	7.4
22	3.2	61	-10.0	54	-15.1	66	-3.3
59	-6.9	5	12.6	56	-10.8	210	11.5
备注	学习中误差 $n_1=10$ $m_1=\pm3.4$mm	备注	工作中误差 $n_2=30$ $m_2=\pm7.8$mm				

神经网络法模拟过程及工作中误差 表9.4

学习集训练中误差(mm)	±10.0	±5.0	±4.0	±2.0	±1.0
迭代收敛次数	1874	3256	3727	7001	11042
工作中误差(mm)	±9.6	±8.4	±8.1	±7.3	±6.9

从表9.4可以看出，当“学习中误差”为±1.0mm时，神经网络模拟精度可达±6.9mm，效果比二次曲面拟合法要好。但该方法的一个较大的缺点是模拟过程受初始权值影响较大(有时还会出现不收敛的情况)，模拟结果不稳定。

3)CF&NNM方法

最后，我们用CF&NNM方法对上例进行了试验。仍以“学习中误差”作为收敛控制参数，初始权值随机赋值，考虑到初始权值对BP网络的收敛速度和模拟结果等都有较大影响，因此，各种情况都尝试了几十次，还没有碰到不收敛的情况，且各次模拟结果(包括迭代收敛次数、模拟出的高程异常结果、试验集工作中误差等)都非常接近。现任选其中3次模拟过程结果列于表9.5。

CF&NNM 法模拟过程及工作中误差 表 9.5

学习集训练中误差(mm)		±2.8	±2.4	±2.0	±1.6	±1.2	±0.8	±0.4
NO.1	迭代收敛次数	491	703	4978	6015	6700	7632	8821
	工作中误差(mm)	±7.6	±6.4	±5.5	±5.8	±5.9	±6.1	±6.2
NO.2	迭代收敛次数	505	631	4645	5457	6053	6804	8998
	工作中误差(mm)	±7.7	±6.5	±5.4	±5.6	±5.7	±6.0	±6.1
NO.3	迭代收敛次数	570	688	5324	6670	7159	8383	9370
	工作中误差(mm)	±7.7	±6.4	±5.5	±5.7	±5.8	±6.0	±6.2

表 9.5 中的数据有明显的规律：①三次模拟结果的“迭代收敛次数”和“工作中误差”都非常接近，说明本文构造的 BP 网络模型的性能比较稳定；②取学习中误差为 ±2.0mm 时，其对应的工作中误差最小(平均值为 ±5.5mm)；③在 ±2.0mm 之后，随着学习中误差的进一步减小，其对应的工作中误差却不断增大。

4)CF&NNM 方法的理论解析

我们利用 CF&NNM 方法对另外一个工程实例也进行了试验，数据结果也有与本工程实例之表 9.5 相同的规律，尤其是学习中误差在某一数值之后，随着学习中误差的进一步减小，其对应的工作中误差却不断增大，究竟是什么原因呢？我们对此进行了深入分析。

实质上，我们构造的 CF&NNM 方法就是利用神经网络方法来探测二次曲面拟合法的(几何曲面)数学模型误差。这一点可以通过 BP 网络结构得到解释：BP 网络结构的输入层中有一参数 ξ(ξ 是二次曲面拟合的结果)，而输出层参数为高程异常偏差 $\Delta\xi=\xi_0-\xi$，即是模拟二次曲面拟合结果 ξ 与真值 ξ_0 之间的差值，相当于模拟二次曲面拟合之数学模型误差。

结合表 9.3 和表 9.5 的数据，初步得出以下结论：二次曲面拟合法的学习中误差是 ±3.4mm，其中大约 40%(即 ±1.4mm 左右)属于二次曲面模型误差，大约 60%(即 ±2.0mm 左右)属于测量误差。因此，当神经网络模拟的学习中误差达到 ±2.0mm 时，正好将数学模型误差基本消除，此时工作中误差最小，平均值为 ±5.5mm，约为二次曲面拟合法工作中误差(±7.8mm)的 70%，效果非常理想。此时，若将学习中误差进一步减小，相当于人为地把测量误差也当作模型误差来处理，这时，模拟会逐步失真，效果当然也逐渐变差，但总体仍然比 CFM 法和 NNM 法要好。当然，在实际工程应用中，如何来判断模型误差和测量误差各占多大比例，有一定困难，需要根据实际经验来估计。

从表 9.4 和表 9.5 还可看出，当“学习中误差”取 ±0.4mm 时，迭代仍然收敛。我们还试验过，即使“学习中误差”取 ±0.1mm 时，迭代还是收敛，说明 CFM&NNM 法构造的 BP 网络的性能很稳定。

取学习中误差为 ±2.0mm，CFM&NNM 方法模拟结果见表 9.6。表 9.6 中的高程异常偏差计算公式为：

$$\delta\xi=\xi_0-\xi'_0 \tag{9.71}$$

式中：ξ_0——已知高程异常；

ξ'_0——用 CFM&NNM 方法计算出的高程异常。

将表 9.6 与表 9.3 仔细比较可知，CFM&NNM 方法的模拟结果确实比二次曲面拟合法有明显改善，如高程异常偏差绝对值大于 10mm 的点，二次曲面拟合法共有 8 个，而 CFM&NNM 方法

只有1个。但对于面积更大、地形复杂的地区，CFM&NNM方法的应用效果还有待检验。

CFM&NNM方法模拟结果　　表9.f

点号	δξ(mm)	点号	δξ(mm)	点号	δξ(mm)	点号	δξ(mm)	点号	δξ(mm)	点号	δξ(m
14	−4.3	69	−2.0	20	−4.9	39	0.7	6	−6.4	62	−1.[illegible]
80	1.2	11	0.7	26	−4.7	50	0.2	10	−8.2	64	−6.[illegible]
31	−4.4	33	−5.1	30	−6.2	52	−2.5	15	−7.7	65	8.6
24	0.9	61	−0.6	32	−0.6	54	−4.8	16	−8.5	66	−1.1
48	−9.6	5	11.5	34	−4.2	56	−0.6	17	−5.8	210	7.7
备注				工作中误差		$n_2=30$		$m_2=\pm5.5$mm			

5)结论

在平坦地区，与二次曲面拟合法(CFM)和神经网络方法(NNM)相比，用CFM&NNM方法转换GPS高程效果更好，当然，对于面积更大、地形复杂的地区，CFM&NNM方法的应用效果还有待检验。另外，神经网络模型在工程应用中有一个缺点就是模拟结果不稳定，初始权值严重影响最终的解，且影响收敛速度，甚至不收敛，但在CFM&NNM方法中构造的BP网络模型，在模拟高程异常偏差$\Delta\xi$时，初始权值对收敛速度和模拟结果几乎没有影响，说明网络性能非常稳定。

需要说明的是，CFM&NNM方法与CFM方法和NNM方法一样，都是数值逼近方法，GPS高程的逼近精度都受已知点的数量和分布状况的影响，更受大地水准面不规则变化的影响。因此为提高GPS高程的精度，尚需从理论上与实用上作进一步的研究。

9.7 GPS精密高程测量的应用

某沿江地形平缓区域的GPS控制网，如图9.10所示，平均边长约1km，区域面积约为10km^2，按国家GPS网B级要求施测。GPS观测采用三台Ashtech公司生产的Z－12型精密测地型GPS接收机进行，仪器标称精度为5mm + 1ppm × S，配置可抑制多路径效应的扼颈圈天线。作业方式采用静态相对定位模式。GPS观测过程中，卫星高度角≥15°，有效观测卫星个

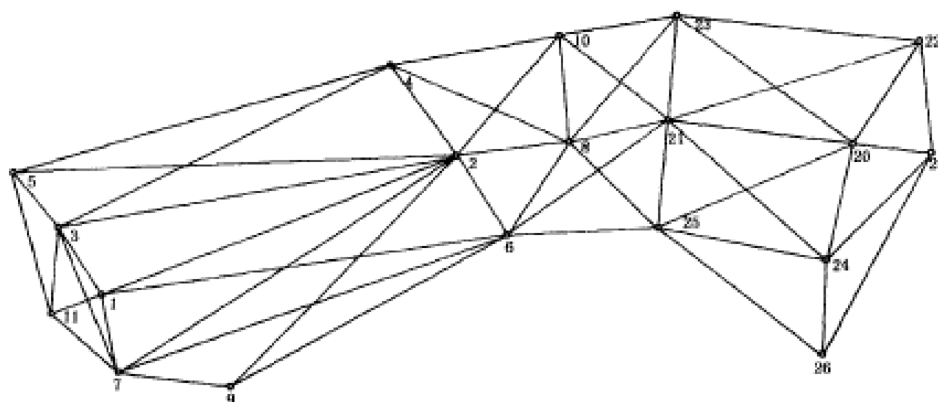


图9.10　某沿江地形平缓区域的GPS控制网

数≥5,采样间隔为20s,观测时间为120min,GDOP≤4;为消除相位中心偏差对测量结果的影响,安置天线时用罗盘定向使天线指北线指向北方;为了削弱电离层的影响,有四分之一的观测值是在夜间观测获得的。

出于研究目的,各控制点均施测了二等水准,并在网中以全站仪TC2002加测了5条边长。采用精密星历实施GPS网的单独平差,最弱点平面位置中误差小于3mm。以坐标反算得的边长与TC2002加测边长比较,最大差异为2.5mm,由此可知,GPS定位达到了较高精度。由于GPS网的边长均小于10km,在GPS平差处理时没有考虑对流层折射的影响。(注:由于边长很短,GPS信号传送到相邻测站时所经过的空间及其气象条件都大致相同,差分GPS技术可基本消除对流层折射的影响。)GPS网共19个点的平差成果和二等水准测量成果见表9.7。

B级GPS高程和二等水准测量成果表(单位:m)　　表9.7

点号	纵坐标 X	横坐标 Y	GPS高程	水准高程
8	3566375.346	499179.740	26.424	5.3896
23	3566854.849	498567.506	30.741	9.7334
10	3566324.251	498659.474	25.790	4.7728
5	3563826.318	499348.917	30.059	9.0030
7	3564312.203	500321.498	31.206	10.1204
11	3564001.762	500035.270	31.338	10.2591
22	3567961.396	498691.018	30.160	9.1622
26	3567524.909	500219.017	31.183	10.1314
4	3565549.066	498813.558	31.110	10.0815
28	3568010.260	499235.369	30.332	9.3182
2	3565858.080	499248.000	31.225	10.1818
3	3564029.592	499613.378	30.134	9.0686
6	3566091.401	499632.434	30.709	9.6536
9	3564827.161	500392.773	29.487	8.4044
21	3566814.699	499080.199	30.989	9.9617
1	3564231.786	499937.723	30.442	9.3676
20	3567660.247	499189.334	31.128	10.1110
24	3567538.805	499757.287	31.074	10.0101
25	3566774.076	499599.745	30.621	9.5500

(1)取全部19个点用二次曲面拟合法按式(9.35)进行拟合,由于粗差的影响,使模型精度很低,拟合中误差为 $m=\pm 6.88$mm(读者可自行验算)。

(2)按式(9.45)进行粗差的定位,发现24、25共两个点含有粗差;剔除这2个点后,在余下的17个点中任选10个点(如取1、2、3、4、6、8、9、20、21、28)作为已知点,用二次曲面拟合法按式(9.35)进行拟合,所有17个点的拟合中误差为 $m=\pm 2.75$mm。

(3)剔除这2个粗差点后,在余下的17个点中用式(9.44)进行显著性检验,取以下8个最显著的点作为已知点:5、7、8、10、11、22、23、26,用二次曲面拟合法按式(9.35)进行拟合,8个已

知点的拟合中误差为 $m=\pm0.27$mm，所有 17 个点的拟合中误差为 $m=\pm1.25$mm，具体拟合结果见表 9.8。由此可见，经过模型优化，虽然参与建模的点个数少了，但拟合精度却提高了很多。

模型优化后的二次曲面法拟合结果 表 9.8

点号	已知高程(m)	拟合高程(m)	差值(mm)	点号	已知高程(m)	拟合高程(m)	差值(mm)
8	5.3896	5.3894	-0.2	4	10.0815	10.0811	-0.5
23	9.7334	9.7331	-0.3	28	9.3182	9.3169	-1.3
10	4.7728	4.7732	0.4	2	10.1818	10.1833	1.4
5	9.0030	9.0028	-0.2	3	9.0686	9.0693	0.7
7	10.1204	10.1201	-0.3	6	9.6536	9.6569	3.3
11	10.2591	10.2595	0.4	9	8.4044	8.4019	-2.5
22	9.1622	9.1622	0.0	21	9.9617	9.9626	0.9
26	10.1314	10.1314	0.0	1	9.3676	9.3674	-0.2
				20	10.1110	10.1090	-2.0
备注	$n=17$， 拟合中误差 $m=\pm1.25$mm						

(4)取模型优化后的 8 个显著点作为已知样本，用神经网络的"混合转换法"(CF&NNM)来进行模拟，取学习中误差为 $m_{学}=\pm0.15$mm，"混合转换法"的模拟中误差为 $m=\pm1.06$mm，比二次曲面拟合法的效果要好。具体模拟结果见表 9.9。

模型优化后的"混合转换法"的模拟结果 表 9.9

点号	已知高程(m)	模拟高程(m)	差值(mm)	点号	已知高程(m)	模拟高程(m)	差值(mm)
8	5.3896	5.3897	0.1	4	10.0815	10.0804	-1.1
23	9.7334	9.7333	-0.1	28	9.3182	9.3168	-1.4
10	4.7728	4.7730	0.2	2	10.1818	10.1831	1.3
5	9.0030	9.0029	-0.1	3	9.0686	9.0687	0.1
7	10.1204	10.1202	-0.2	6	9.6536	9.6559	2.3
11	10.2591	10.2590	-0.1	9	8.4044	8.4026	-1.8
22	9.1622	9.1623	0.1	21	9.9617	9.9629	1.2
26	10.1314	10.1313	-0.1	1	9.3676	9.3669	-0.7
				20	10.1110	10.1093	-1.7
备注	$n=17$， 模拟中误差 $m=\pm1.06$mm						

(5)结论

①由于测量中诸多因素的影响，使有些点实测高程异常值含有粗差；建模前，对异常数据的判定和剔除是确保模型质量的重要步骤；

②对参与建模的点进行显著性判断也是十分必要的；把建模作用显著的点纳入高程异常模型，而不必把全部已知点纳入模型建立中，以达到模型优化的目的，从本工程实例的应用情况来看，效果非常明显；

③对模型作用显著点的空间分布，将随点的位置、图形、高程分布的差异而不同；就本例而言，对模型作用显著的点是分布于控制区周边的那些点；为使建模型的质量可靠，必须提高这些点观测值的精度；

④B级GPS网，其高程测量精度是很高的；采用模型优化后的二次曲面拟合法，拟合推算的高程与二等水准值相比，差值微小，拟合中误差仅为 $m=\pm1.25$mm，可以达到二等水准测量的精度要求；

⑤在模型优化之后，再采用神经网络的CFM&NNM方法进行模拟，模拟中误差为 $m=\pm1.06$mm，模拟效果比二次曲面拟合法要好；CFM&NNM方法在本例的模拟过程中，同样具有本章第4.4节提到的规律，如：在几百次模拟迭代中，还没有碰到不收敛的情况，即使学习中误差取 $m_{学}=\pm0.03$mm 时，迭代仍然收敛，说明网络性能非常稳定；各次模拟迭代次数及模拟结果均非常接近；由本算例再一次验证了CF&NNM方法的有效性。

10 GPS工程应用

10.1 GPS在大地控制测量中的应用

(1)概述

GPS定位技术以其精度高、速度快、费用省、操作简便等优良特性被广泛应用于大地控制测量中。进入到21世纪,可以说GPS定位技术已完全取代了用常规测角、测距手段建立大地控制网的大地测量。我们一般将应用GPS卫星定位技术建立的控制网叫做GPS网。归纳起来大致可以将GPS网分为两大类;一类是全球或全国性的高精度GPS网,这类GPS网中相邻两点的距离在数千公里至上万公里,其主要任务是作为全球高精度坐标框架或全国高精度坐标框架,为全球性地球动力学和空间科学方面的科学研究工作服务,或用以研究地区性的板块运动或地壳形变规律等问题。另一类是区域性的GPS网,包括城市或矿区GPS网、GPS工程网等,这类网中的相邻点间的距离为几百米至几十公里,其主要任务是直接为国民经济建设服务。

(2)中国国家高精度GPS大地控制网

研究地球的形状及其随时间的变化是大地测量的一项重要任务,因此建立全球高精度大地控制网是大地测量工作者多年来一直梦寐以求的目标。直到空间技术和射电技术高度发达,才得以建立跨洲际的全球大地网,但是由于VLBI、SLR技术的设备昂贵且非常笨重,因此在全球也只有少数高精度大地点,直到GPS技术逐步完善的今天才使全球覆盖的高精度GPS网得以实现。

1991年国际大地测量协会(LAG)决定在全球范围内建立一个IGS(国际GPS地球动力学服务)观测网,并于1992年6月至9月间实施了第一期会战联测,我国借此机会由多家单位合作,在全国范围内组织了一次盛况空前的“中国'92GPS会战”,目的是在全国范围内确定精确的地心坐标,建立起我国新一代的地心参考框架及其与国家坐标系的转换参数;以优于10^{-8}量级的相对精度确定站间基线向量,布设成国家A级网。中国国家A级GPS网共有27个主点和6个副点。A级网点的GPS观测从1992年7月25日至8月5日进行,在这33个点上进行了9昼夜的连续观测。国家A级网将作为国家高精度卫星大地网的骨架并为地壳运动及地球动力学的研究奠定基础。

中国国家A级和B级GPS大地控制网分别于1996年和1997年建成并先后交付使用,这标志着我国空间大地网的建设已进入一个新阶段。它不仅在精度方面比已往的全国性大地控制网大体提高了两个量级,而且其三维坐标体系是建立在有严格动态定义的先进的国际公认的ITRF框架之内。这一高精度三维空间大地坐标系的建成将为我国21世纪前10年的经济和社会持续发展提供基础测绘保障。

中国国家A级和B级GPS大地控制网分别由33个点和800个点构成。它们均匀地分布在中国大陆,平均边长相应为650km和150km。这两个网的数据处理采用了后处理精密星历

和ITRF坐标框架，以便使中国国家A级和B级GPS网能准确地定位在这个全球性的参考系中。A级GPS网，其水平方向的重复精度好于2×10^{-8}，垂直方向好于7×10^{-8}；对B级GPS网来说，则分别好于4×10^{-7}和8×10^{-7}。

新布成的国家A、B级网已呈现我国现代大地测量和基础测绘的基本框架，将在国民经济建设中发挥越来越重要的作用。国家A、B级网以其特有的高精度把我国传统天文大地网进行了全面改善和加强，从而克服了传统天文大地网的精度不均匀、系统误差较大等传统测量手段不可避免的缺点。通过求定A、B级GPS网与天文大地网的数学转换关系，从而使国家大地点的服务应用领域更宽广。利用A、B级GPS网的高精度三维大地坐标，并结合高精度水准联测，从而大大提高了确定我国大地水准面的精度，特别是克服我国中西部大地水准面存在较大系统误差的缺陷。

国家A级和B级GPS大地控制网的建成，标志着我国具有分米级绝对精度的三维大地控制坐标系统已基本建立，它将为我国空间技术和空间基础数据、动态实时定位等技术提供一个精确可靠的参照系。此外，中国国家A级和B级GPS大地控制网中大部分点位，均用水准进行了联测，以确定它们的正常高。同时不少网点也和原有的用经典方法测定的大地点和沿海的验潮站等进行了联测。所有这些将为我国地壳运动监测、中国局部大地水准面的求定、新老大地网的拼接和转换、以及全球变化中海平面上升的监测提供基础数据，为21世纪前期的中国经济和社会持续发展做出贡献。

(3)区域性GPS大地控制网

所谓区域GPS网是指国家C、D、E级GPS网或专为工程项目布测的GPS工程网。这类网的特点是：控制区域有限（或一个市或一个地区）、边长短（一般从几百米到20km）、观测时间短（从快速静态定位的几分钟到两个小时）。

由于GPS定位有精度高、速度快、费用省等优点，因此，目前我国建立区域大地控制网的手段已基本采用GPS技术而很少使用传统方法。就其作用而言主要有以下四个方面。

1)建立新的地面控制网

尽管我国在70年代以前已布设了覆盖全国的大地控制网，但由于人为的破坏，现存的控制点已不多，当某个区域需要建立大地控制网时，首选方法就是用GPS技术来建网。

2)检核和改善已有地面网

对于现有的地面控制网由于经典观测手段的限制，精度指标和点位分布都不能满足国民经济发展的需要，但是考虑到历史的继承性，最经济、有效的方法就是利用高精度GPS技术对原有老网进行改造，合理布设GPS网点，并尽量与老网重合，再把GPS网和经典控制网一并联合平差处理，从而对老网进行检核和改善。

3)对老网进行加密

对于已有的地面控制网，除了本身的点位密度不够以外，人为的破坏也相当严重，为了满足基本建设的需要，采用GPS技术对重点地区进行控制点加密是一种行之有效的办法。布设加密网时要尽量和本区域的高等级控制点重合，以便较好地把新网同老网匹配好，从而避免控制点误差的传递。

4)拟合区域大地水准面

GPS技术用于建立大地控制网，在确定平面位置的同时，能够以很高的精度确定控制点间的相对大地高差，如何充分利用这种高差信息是近几年许多学者热烈讨论的一个话题。由于地形图测绘和工程建设都依据水准高程，因此必须把GPS测得的大地高差以某种方式转化成

水准高差，才便于工程建设使用。通常的方法是：a.采用一定密度及合理分布的GPS水准高程联测点(即GPS点上联测水准高程)，用数学手段拟合区域大地水准高程。b.利用区域地球重力场模型来改化GPS大地高为水准高。

10.2 GPS在变形监测中的应用

随着各种大型建筑物的兴建，建筑物变形监测越来越重要。在对建筑物进行快速、实时监测方面，传统的变形测量方法已显得越来越力不从心。由于GPS具有高效、快速、全天候、全自动等特点，已广泛应用于各种测量。近年来，GPS用于变形监测得到迅速发展，如用于地壳形变监测、大坝变形监测、高层建筑物变形监测等。GPS用于变形监测的作业方法主要有经典静态测量方法和动态测量方法。经典静态测量方法用于缓慢变形场合，如地壳形变等；动态测量方法用于快速变形的场合，如高层建筑的风振监测、桥梁动态变形监测。

10.2.1 GPS工程变形监测的试验研究

工程变形监测通常要求达到毫米级或亚毫米级的精度，而监测的边长一般为300～1000m。对于这样短的边长，GPS能否达到上述精度，武汉大学测绘学院做了模拟试验。

模拟试验工作在武汉大学测绘学院校园内的GPS跟踪站与四号楼间进行。试验过程中GPS跟踪站的接收机天线始终保持固定不动。四号楼楼顶的GPS接收机天线安置在一个活动仪器平台上。平台可以在两个互相垂直(东西和南北向)的导轨上移动。移动量通过平台上的测微器精确测定(读至0.01mm，其精度保持在0.1mm)，因天线的位置移值可视为已知值。然后通过与GPS定位结果进行比较来检核其精度，评定利用GPS定位技术进行变形观测的能力。试验时每隔5h左右移动一次平台。数据处理采用改进后的GAMIT软件和精密星历进行，并分别计算了5h解，2h解和1h解。5h、2h、1h解的测试分别进行了10组，其结果列于表10.1。

边长监测测试结果表　　　　表10.1

指标 ＼ 精度 ＼ 时间	5h	2h	1h
位移分量中误差 $M\delta_X$	±0.36mm	±0.54mm	±0.91mm
位移分量中误差 $M\delta_Y$	±0.37mm	±0.64mm	±0.78mm
位移分量误差≤0.5mm	89%	61%	48%
位移分量误差≤1.0mm	100%	94%	72%
位移分量误差≤2.0mm		100%	98%
最大误差	0.7mm	1.7mm	2.4mm

从表10.1可看出，若用一个基准点来进行变形监测，利用5hGPS观测值求出监测点平面位移分量中误差约为±0.4mm；利用2hGPS观测值求出监测点平面位移分量中误差约为±0.6mm；利用1hGPS观测值求出监测点平面位移分量中误差约为±1.0mm。若利用两个基准点，其监测精度可进一步提高。测试结果表明，只要采取一定的措施，利用GPS技术进行各种工程变形监测是可行的。

10.2.2 GPS在木塔变形监测网中的应用

(1)概况

应县佛宫寺释迦木塔，位于山西省应县城西北佛光寺内，寺院占地面积为22945m²，地面高程为1002m。应县木塔建于辽清宁二年(公元1056年)，塔高为65.86m，塔底直径为33.15m，塔平面呈八角形六檐。有明层五层，层间平座形成暗层，实际上是九层高耸木结构建筑物。塔身为楼阁式，全部用木材建造。塔的梁、枋、柱、斗拱连成完善的整体，设计科学、结构精巧、造型美观，整个塔气势雄伟、巧夺天工，是我国目前保持最好的辽代木塔，也是目前世界上现存的惟一木结构楼阁式的宝塔，堪称绝世精品。1961年国务院将其公布为重点文物。

为了及时了解塔的现状，为塔的维修提供可靠现势性的数据，保证塔的安全运转，需要对塔进行长期有序的变形监测。

(2)控制网的布设

应县木塔变形监测GPS网的设计经过实地踏勘后在1:10000地形图上设计，经计算机优化设计，其图形如图10.1所示，由8个控制点组成，加上两个国家二等点，共计有10个点构成GPS变形监测网，采用国家54北京坐标系和黄海高程系统。在施测时，由五台GPS接收机安置在两个国家二等点和网中的1号点、2号点、3号点组成同步环引测54北京坐标。

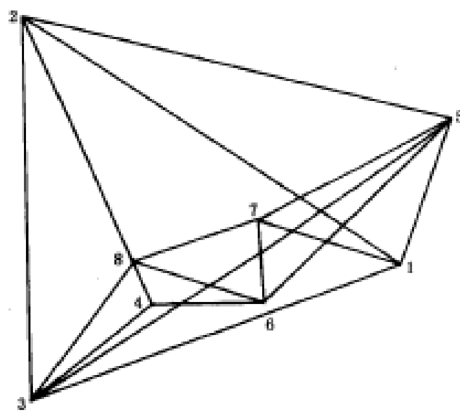


图10.1 木塔变形监测GPS网

以1号和2号点作为应县木塔变形监测控制网的起始数据，同时也作为GPS网的起始数据，在GPS网作为变形监测网时作为约束平差的约束点，这样大地网和GPS网起始数据相同，当用各自的观测值求出其他点的坐标时，成果可以进行比较。

(3)GPS测量和限差的规定

为了保证GPS建立的监测网其点位中误差优于±2mm，特制定下列几点规定：

1)采用观测仪器的台数不少于五台，仪器标称的精度不低于±(5mm+2ppm)；

2)应用长时间段、同步环观测时，要形成多边形网的扩展方式，采用面连接或边连接方法，就是说相邻的同步环是由三个公共点或一条公共边扩展出去的。在每个测站点上至少设站观测2次；

3)观测的技术要求规定如下：卫星高度角≥15°，有效观测卫星数>4，观测时段数为2，观测时段内同步观测90min，数据采集的间隔15s，卫星分布在4~2象限GDOP<5，天线精度的安置在强制对中螺旋上，三次量取天线高之差<2mm；

4)GPS限差由软件中自动检验的指标确定，如：同步环各坐标分量、全长闭合差、异步环各坐标分量、全长闭合差、复测基线较差等都有相应的指标。

(4)应县木塔GPS监测网的监测精度

应县木塔GPS监测网的监测精度采用了内部符合精度和外部符合精度两种方式进行比较确定。

1)内部符合精度

应县木塔GPS监测网由10个站点组成，共观测向量基线30条，用4个时段，复测边数12条，共15个点次，同步环31个，异步环4个，复测基线、同步环和异步环全部符合程序的检验。GPS监测网三维无约束平差、边长相对精度和点位误差列表如表10.2、表10.3所示。

边长相对精度　　表10.2

序号	边名	向量边长(m)	相对精度(K)
1	8-2	320.58212	1/616600
2	1-3	437.78537	1/724400
3	2-3	470.27630	1/905200
4	3-7	334.45979	1/713600
5	6-5	307.70125	1/616100
6	6-8	145.78171	1/276600
7	7-5	247.74319	1/492500
8	6-7	97.76905	1/205900
9	4-7	152.78956	1/331600
10	4-8	68.26980	1/137300
11	3-4	182.56866	1/391000

点位误差表　　表10.3

点号	m_X(mm)	m_Y(mm)	m_Z(mm)	m_W(mm)
8	0	0	0	0
2	0.69	0.83	0.76	1.32
1	1.05	1.30	1.28	2.10
3	0.70	0.85	0.79	1.36
7	0.69	0.83	0.79	1.33
6	0.59	0.82	0.78	1.28
5	0.82	1.01	1.00	1.64
4	0.62	0.77	0.70	1.21

从表10.2和表10.3中可以看出最弱边为4-8号边，其向量边长68.2698m，相对误差为1/137300，点位误差8个点只有1号点为2.10mm，其余都小于1.8mm。

2)外部符合精度

应县木塔有常规大地测量成果，因此可以和GPS测量的成果进行比较。

①坐标值比较

坐标值较差及点位较差如表 10.4 所示。

坐标值较差 表 10.4

点号	Δ_X(mm)	Δ_Y(mm)	点位较差(mm)	点号	Δ_X(mm)	Δ_Y(mm)	点位较差(mm)
1	0	0	0.0	5	0	5	5.0
2	0	0	0.0	6	-1	2	2.2
3	0	-4	4.0	7	-2	0	2.0
4	3	1	3.2	8	-1	-1	1.4

监测网设计的点位精度为 ±1.8mm，我们把大地网和 GPS 网视为同精度，并取 2 倍中误差为允许误差，允许误差 $=2\times\sqrt{2}\times1.8=\pm5.1$mm。从坐标值比较可以看出所有点都在允许误差的范围之内，大部分点较差很小，只有 5 号点接近允许误差。

②基线边测量的比较

基线边测量的较差请见表 10.5。

基线边测量较差 表 10.5

边名	全站仪测边(m)	GPS 测边(m)	较差(mm)	相对精度
2-3	470.273	470.271	2	1/235100
2-1	507.290	507.290	0	1/9999999
2-8	320.585	320.581	4	1/80100
3-4	182.505	182.495	10	1/18200
3-1	437.779	437.775	4	1/109400
3-8	209.207	209.204	3	1/69700

通过内符合精度评定和外符合精度评定的结果说明，GPS 成果按上述的技术指标进行监测，网平面点位误差可达到控制网设计精度 ±1.8mm 的要求。应用 GPS 建立监测网比大地测量建立监测网在相同的精度要求下，将大大提高工作效率，并快速提供成果，经济效益良好。

10.2.3 隔河岩大坝 GPS 自动化监测系统

隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统，由湖北清江水电开发有限公司与武汉大学联合组成课题组，于 1995 年立项，经可行性论证、技术设计、系统建设 3 个阶段，于 1997 年 5 月投入试运行，1998 年 4 月正式投入运行。1999 年 12 月又进行系统解算软件升级和解决千周问题，至今一直运行正常，尤其经受 1998 年特大洪水的考验，并发挥了作用。

(1)GPS 自动化监测系统的结构

GPS 自动化监测系统由数据采集、传输、处理三大部分组成。

1)GPS 数据采集

全系统由 7 台 GPS 组成，其中 GPS1、GPS2 为基准站，GPS3 至 GPS7 为坝面外观监测站，其中 GPS3 位于坝肩，GPS6 位于拱冠(详见图 10.2)。

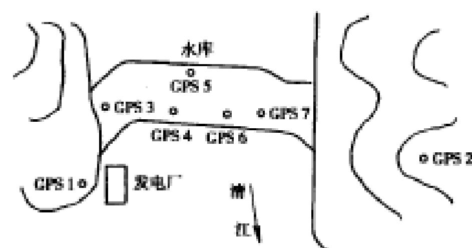


图 10.2 隔河岩大坝 GPS 监测点布置示意图

2)数据传输

为实现 GPS 自动化监测，GPS 观测的资料自

动、准确地传输是系统的关键。经理论研究结合现场实践调试，GPS1 和 GPS2 采用新一代 DS 扩频无线通讯技术，选用频率为 2.4GB 的无线网络设备，资料速率为 25Mb/s，在控制中心 HUB 上采用高增益全向天线，接收两基准站的数据。大坝上 GPS3 至 GPS7 用一台工控机采集资料，由于坝上各 GPS 站点离工控机较远，因此工控机采用多路开关、智能多串口卡、光隔离器等技术，通过 RS-232 对 GPS 观测的资料和板面信息进行控制和采集，再通过光纤传输至控制中心。

3)数据处理

数据处理包括总控、数据处理、数据分析、数据管理 4 个模块组成，这是 GPS 自动化监测系统的核心。

总控模块负责整个系统数据传输控制，数据流的分发、管理和对 7 台 GPS 接收机工作状况的实时监控；数据处理模块负责资料格式转换、清理、基线解算、平差计算、坐标转换、输出、精度评定等；数据分析模块负责变形参数精度分析、灵敏度分析、基准稳定性分析、变形量时序、频谱分析、变形直观图输出与显示等；数据管理模块负责数据压缩(4:1)、进库、转贮、库文件管理、打印各种报表等。

采集、传输、数据处理三大部分采用局域网络联成一个有机的自动化系统，网络结构见图 10.3。

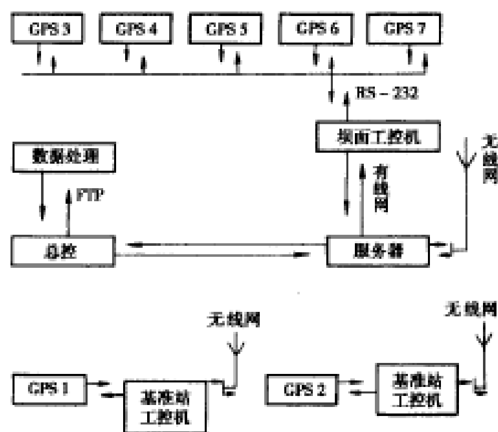


图 10.3 隔河岩大坝 GPS 自动化监测系统网络结构图

(2)GPS 自动化监测系统的精度分析

1)内符合精度

根据平差计算的精度计算公式来评定系统输出变量的精度，其结果见表 10.6 和表 10.7。

系统输出的变形量精度(6h 解，单位：mm) 表 10.6

点号	$M_{\Delta X}$	$M_{\Delta Y}$	$M_{平面}$	M_H
GPS5	0.38	0.31	0.49	0.73
GPS6	0.38	0.31	0.49	0.74
GPS7	0.39	0.32	0.50	0.75

系统输出的变形量精度(2h 解，单位：mm) 表 10.7

点号	$M_{\Delta X}$	$M_{\Delta Y}$	$M_{平面}$	M_H
GPS5	0.46	0.38	0.60	1.17
GPS6	0.46	0.38	0.60	1.17
GPS7	0.48	0.40	0.62	1.20

从表中可看出，6h 解的精度优于 ±0.8mm，2h 解的精度优于 ±1.3mm。

2)外符合精度

与垂线观测值(径向)比较，评定平面位移的精度，其结果列于表 10.8(仅列 GPS6 点)。

汛期用两种方法所测定的 GPS6 的径向位移　　表 10.8

观测时间	水位(m)	倒锤观测值(mm)	位移(mm)	GPS 观测值(mm)	位移(mm)	较差(mm)
1998-8-8,3:00	203.88	12.76	0.75	16.63	1.56	-0.81
1998-8-8,9:00	203.91	12.76	0.75	17.32	2.25	-1.50
1998-8-8,16:00	203.72	12.94	0.93	17.06	1.99	-1.06
1998-8-8,21:00	203.38	12.03	0.02	15.39	0.32	-0.30
1998-8-9,3:00	202.97	12.30	0.29	15.09	0.02	0.27
1998-8-9,9:00	201.92	11.62	-0.39	14.59	-0.48	0.09
1998-8-9,16:00	200.76	10.44	-1.57	12.98	-2.09	0.52
1998-8-9,21:00	200.02	10.26	-1.75	11.42	-3.65	1.90
…	…	…	…	…	…	…
1998-8-30,9:00	196.17	7.56	-4.45	9.90	-5.17	0.72

由表 10.8 可看出，若垂线法观测结果无误差(即为真值)，可求出 $m_{径}=\pm0.92$mm，若两种方法同精度，则 $m_{径}=\pm0.65$mm，与精密水准测量结果比较，评定垂直位移精度，其结果列于表 10.9(仅列出 GPS6 点)。

由表 10.9 可看出，若精密水准测量无误差，可求出 $M_h=\pm1.02$mm，若两种方法同精度，则 $M_h=\pm0.72$mm。从以上内、外符合精度可看出，GPS 自动化监测系统 6h 解的平面和垂直位移精度优于 ±1.0mm，2h 解算的精度优于 ±1.5mm。

精密水准与 GPS 结果比较(单位：mm)　　表 10.9

时间	水准测定值	水准测位移值	GPS 测定值	GPS 位移	较差
1998-07-06	-0.24		5.5		
1998-08-06	-1.41	-1.17	5.3	-0.2	-0.97
1998-08-07	-1.86	-1.62	5.3	-0.2	-1.42
1998-08-08	-2.58	-2.34	2.8	-2.7	0.36
1998-08-10	-1.89	-1.68	3.6	-1.9	0.22

(3)GPS 自动化监测系统的响应速度

表 10.10 列出了系统中传输、解算、入库三大部分的时间测试，其中数据传输时间还包括因误码重复传输的时间在内。

响应时间测试　　表 10.10

	6h 观测值响应时间	2h 观测值响应时间	1h 观测值响应时间
2 个 GPS 基准站观测数据传输时间	4~5min	3~4min	2~3min
坝面 5 个 GPS 监测点观测数据传输时间	1.5min	1min	50s
观测值数据处理时间	3min	2min	1min
解算结果入库时间	20s	20s	20s

从表 10.10 可看出，系统响应时间少于 10min(一般情况 8min 即可完成)，即从控制中心发指令开始到解算结果显示全过程的时间小于 10min。

(4)GPS 自动化监测系统可靠性分析

GPS 自动化监测系统的可靠性定义为：系统一年 365 天不间断运行，硬、软件可靠，监测资料准确可靠，系统响应时间小于 10min，系统故障率低，发生故障易于及时排除。本系统自 1998 年 4 月投入运行，从采集资料到传输、解算、显示、输出、入库、转储等全过程实现全自动化。7 台 GPS 接收机工作一直正常(除停电外)，采集资料完整、正确，系统局域网中的工控机、服务器、PC 总控机、工作站也未发生任何部件故障，说明系统中的硬件性能稳定、可靠。

四个软件模块自运行以来，工作一直正常，系统无需人工值守，实现了全自动，响应时间小于 10min，表明了系统软件及网络功能完善、可靠性高。7 台 GPS 接收机天线均安装在野外，主机安装在廊道或工控房内，从安装至今，未遭任何天然或人为的破坏，表明 GPS 接收机的安全保护措施有效、可靠。

表 10.11 是对系统可靠性抽样检查统计表，从表中可看出，即使在汛期，暴风雨、泄洪等不利条件下，系统仍能稳定可靠地工作，系统提供合格解的概率仍高达 96%。

GPS 监测系统工作状况统计表(1998 年 7、8 月份)　　表 10.11

时　间	系统提供解的类型	系统应提供解的个数 (N)	系统实际提供解的个数(n)	成功率 (n/N)
7 月 1 日－8 月 5 日共 35 天	6h 解	1008	953	95%
8 月 6 日－8 月 31 日共 26 天	2h 解	2184	2118	97%

(5)结论和建议

隔河岩大坝外观 GPS 自动化监测系统是 GPS、数学通讯、计算机网络、自动控制、精密工程测量及现代数据处理等高新技术的集成。系统 6h 解的三维精度达亚毫米级、2h 解的三维精度优于 ±1.5mm。系统实现了从数据采集、传输、处理、分析、显示、入库的全自动化。从数据采集到结果输出在 10min 内完成，即使在汛期、泄洪等恶劣条件下，系统提供合格解的比例仍高达 96%。利用 GPS 进行大坝外观变形监测，具有精度高、速度快、全自动、全天候、同时测定三维位移和监测点间能同步观测且无需通视等优点，这为大坝外观自动化监测提供了一种新方法。本系统还可应用于高层建筑物、电视塔三维变形实时监测，也可应用于滑坡、高边坡外观变形监测，亦可应用于码头、船闸、大型桥梁实时动态监测。

10.3 GPS 在路线勘测中的应用

10.3.1 概述

线路勘测、管线测量及隧道贯通测量是铁路、交通、输电、通讯等工程建设中重要的工作。以往大多采用传统的控制测量、工程测量方法进行控制网建立及施测，由于该类测量控制网大多以狭长形式布设，并且周围已知控制点很少，使得传统测量方法在网形布设、误差控制等多方面带来很大问题。同时传统方法作业时间也比较长，直接影响了工程建设的正常进展。

目前，GPS 技术已广泛应用于线路控制测量，它具有常规测量技术不可比拟的技术优势：速度快、精度高、不必要求点间通视。然而，GPS 在工程应用中，必须充分顾及其服务对象的特点，道路是蜿蜒伸展的细长型工程构筑物，高等级公路常常长达数百公里甚至上千公里，对其建立的控制自然须紧随线路并贯串全线，所测定的测量控制点必须可靠，并要求在一定范围内

的点位之间具有较高的相对精度。下面简要介绍 GPS 技术用于路线勘测的几个问题。

10.3.2 GPS 线路控制网的布设

(1)常规导线测量的缺陷

按现行《公路路线勘测规程》(JTJ 061—85)的规定，作为控制网的初测导线的等级较低，边长较短(最长边不超过 500m)、全长不受限制，而且即使对于路线起终点亦不强调必须与国家已知控制点联测。由于高等级公路线形标准的要求较高，工程量较大，近年来已出现了提高初测导线精度等级的趋势，例如采用了城市一级导线。观测精度虽有提高，但如导线两端附合到高等级控制点，或附合导线全长过大，仍不能有效地检核出测量和计算可能存在的粗差，因此难以确保导线点位的可靠性。例如沪杭高速公路(上海段)的近 20km 线路导线的全长闭合差将近 1m，虽小于其容许值 1.4m，仍有可能掩盖个别边长和角度观测值所含有的数十厘米的粗差。由于沿线附近国家控制点的数量严重不足，采用常规测量技术难以布设全长符合规定(例如按城市测量规范为 3.6km)的分段附合导线。即使先布设四等导线，也难以保证按四等导线的全长要求与国家控制点联测。

(2)用 GPS 技术分两级来建立线路控制网

GPS 接收机的标称精度为($5 \sim 10mm + 2ppm \times D$)，GPS 网相邻点间弦长的实测精度一般均高于标称精度。但对于 GPS 观测值，也需对其正确性作出检验，以摒弃可能出现的粗差，如果在整条线路上按照初测导线点的边长(50 ~ 500m)进行 GPS 单一导线测量，就无法进行有效的检验，正确的做法是，每隔若干点即需构成闭合环形，由于控制网呈狭长线型，每个闭合环中必有一条长达数公里的长边，它由两个不相邻的导线点连接而成。

为此可将线路控制网分两级：

①用 GPS 技术建立边长较长的高一级的线路控制网；

②用 GPS 技术或用常规测量技术进行线路导线测量，各段导线两端的附合点即为高一级的 GPS 控制网点。

分级布网既能保证在几公里范围内的导线点间具有较高的相对点位精度，较大的可靠性(两端有高一级 GPS 点所控制)，同时由于高一级线路控制网的统一布设，这种相对点位精度将在整条线路上顺次延续。

长线路中导线点数很多，分两级布网还可简化 GPS 网的数据处理工作。当所使用的 GPS 接收机不具备快速静态定位功能时，线路导线可改用常规测量技术。此时，GPS 测量就提供了通常难以获得的每段导线的两端的高级控制点。沪杭高速公路(上海段)和沪宁高速公路都是采用这种方法实施的，算得的导线全长闭合差都只有几个厘米。

10.3.3 GPS 线路控制网的网形

(1)高一级的 GPS 线路控制网

它由多个异步闭合环所组成，每环的 GPS 基线向量不宜超过 6 条，边长为 2 ~ 4km，闭合边及与国家三角点的联测边，其长度不受限制。

沪杭高速公路(上海段)所布的 GPS 网，是由单条公共边来接连每个相邻闭合环，这种网形较之于各环仅由单点连接具有更高的图形强度，更有利于所加密的各条导线间的相对精度的延续性。

(2)GPS 线路导线

可按单导线布设，点位的选定除满足 GPS 要求外，尚需考虑便于定测放样，为此尽可能保持点间通视，在困难情况下，可降低为每个导线点上至少有 1 个通视方向(不一定是所有相邻点)。每段 GPS 导线的各条边的 GPS 基线向量，连同由高一级 GPS 网所得的两端点间基线向量，即可构成异步闭合环来检查观测值的质量。

10.3.4 内业平差优化处理

(1)内业平差优化处理的方法

1)一般 GPS 工程控制网内业平差处理方法

一般 GPS 工程控制网内业平差处理时，首先根据外业采集数据和基线解算条件按站际星际间的双差数学模型进行基线解算，求得相邻同步观测点间的坐标差值($\Delta X_{ij},\Delta Y_{ij},\Delta Z_{ij}$)；然后在此基础上，通过对独立基线边、重复基线边、同步观测环和异步观测环闭合差的检验来检核外业观测成果的质量。根据规范要求合格的基线解算结果应满足以下 4 个条件：

①均方差在 ±10mm 左右，方差比(RATIO 因子)大于 3；

②2 个不同时段的重复基线边求得的边长之差小于 $2\sqrt{2}\sigma$(mm)，其中，σ 为基线观测的标准差；

③同步环点位闭合差小于 $\sqrt{3n}\cdot\sigma/5$(mm)；

④独立异步环点位闭合差小于 $2\sqrt{3n}\cdot\sigma$(mm)；

若通过检验，基线成果全部合乎规范要求，即可进行最后的网平差。

网平差又可分成三维自由网平差和二维约束平差两个过程，其平差观测值为全部合格的基线坐标差值。在进行三维自由网平差时若测区内有 WGS—84 坐标系统下的高级点，则以其作为起算点；若测区内无 WGS—84 坐标系统下的高级点，则以 GPS 观测网中观测时间最长点的单点定位结果的平均值作为起算点坐标。

2)公路勘测 GPS 控制网内业平差优化处理方法

①公路勘测 GPS 控制网点位布设特点

在公路勘测中 GPS 主要用于布设首级平面控制网，其点位一般布设成如图 10.4 所示的图形，即每隔 4km 左右布设一对相互通视、边长为 300m 左右并埋设标石的 GPS 点，这样的布设主要是为了有利于后续用全站仪来加密布设附合导线或施工放样，但是，由于控制点间的边长过于悬殊，导致内业数据处理过程中存在一些较为明显的不合理成分，如为了有效检验外业基线成果的质量，必须在网中形成一定数量的异步闭合环，由于异步环中边长较为悬殊(有几百米的，也有十几公里的)，虽然其满足上述基线检核的各项限差条件，但若不加区别地将全部基线纳入网中进行平差计算，由于长边的系统误差比短边系统误差明显要大(这是由双差数据处理模型所决定的，特别是单频接收机观测的结果)，因而长边绝对精度要比短边低很多，若将它们一同平差，势必将长边误差传递到短边中，大大削弱短边的精度，影响整个控制网的点位精度。

②内业平差优化处理方法

为了较为合理地处理上述问题，根据公路勘测 GPS 控制网点位布设特点，东南大学 GPS 应用研究室通过几个公路勘测首级 GPS 控制网建立的实践，提出了一种行之有效的优化处理方法，较好地解决了这一问题。此法的实质就是在内业平差处理时将形成异步环的较长边(10km 以上，如图 10.4 中的 *AE*、*EJ* 和 *AJ* 边)仅用于基线成果的检核，不纳入网平差计算的范畴，以提高整个 GPS 网的点位精度。具体运用时应在常规内业平差处理的基础上按以下两方

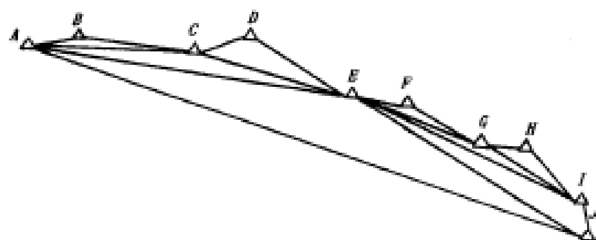


图 10.4 公路勘测 GPS 首级控制网示意图

面进行优化处理：

首先，按常规进行基线解算和观测成果的检验。在经过 4 项检验特别是经过异步环闭合差检验合格后，进入下一步的网平差计算。

其次，在保证所有待定点均能坐标解算的前提下，将 GPS 控制网中用于形成异步环的较长基线边删除，再进行三维自由网平差和二维约束平差。虽然此时 GPS 控制网的网形类似支导线的形式，但由于已经经过基线检核，因而其解算成果也是可靠的。

(2)内业平差优化处理的实例

图 10.5 是江苏省高邮市某公路勘测 GPS 首级平面控制网示意图。为了获得准确的首级平面控制点坐标，在导线测量之前先利用 GPS 静态测量模式测定了 10 个首级平面控制点。这 10 个点沿线路布设，且每个点至少有一个通视方向，并埋设水泥桩，以便长期保存。GPS 静态测量时，用 3 台标称精度为 5mm + 2ppm × D 的南方 NGS200 接收机观测了 5 个时段，每个时段同步观测的时间均超过 50min，外业观测时其 GDOP 均小于 4。外业观测结束后用南方 GPS 内业处理软件进行了基线平差处理，按照 4 项基线检核条件进行了检核，其独立基线及重复基线均满足要求，其同步环最大坐标闭合差为 20mm，最小为 0mm，相对精度最高为 0.34×10^{-6}，最低为 1.93×10^{-6}；其异步环最大坐标闭合差为 64mm，最小为 0mm，相对精度最高为 0.86×10^{-6}，最低为 1.87×10^{-6}，均满足检核条件。

分别按以下两种方法进行三维自由网平差，并以 54 北京坐标系统的参考椭球参数进行二维约束平差，得出了各待定点的平面坐标。平差时，以 119°18′为中央子午线、GD01 的 WGS—84 坐标为起始点坐标、WGS—84 坐标系的方向和尺度为基本条件，进行二维约束（相当于独立坐标系）。

第 1 种方法为常规平差计算方法，即按图 10.5 所示的网形将所有合格基线一同参与平差计算；第 2 种方法为优化处理方法，即将用于组成异步环的较长边删除，形成图 10.6 所示的网形进行平差计算。两种方法的主要处理结果分别见表 10.12 ~ 表 10.15。

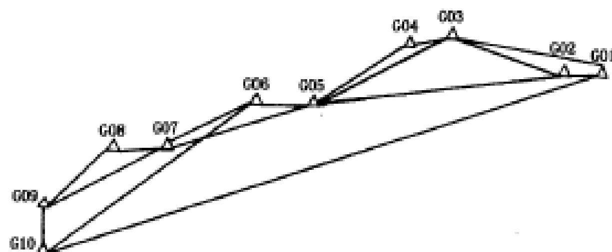


图 10.5 高邮市某公路勘测 GPS 首级控制网示意图

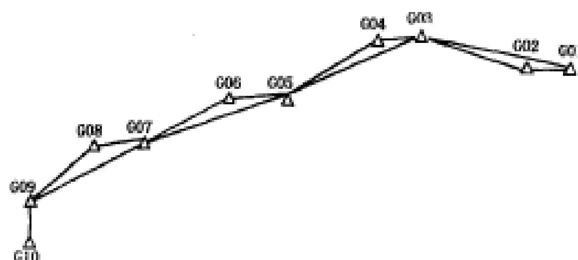


图 10.6 删除长边后的网形

用常规方法进行自由网平差的结果 表 10.12

点名	纬度	中误差(cm)	经度(东经)	中误差(cm)	高程(m)	中误差(cm)
GD01	32°42′23.12696″	0.3	119°22′05.35884″	0.3	18.736	0.7
GD02	32°42′21.14170″	0.3	119°21′55.65570″	0.4	23.002	0.7
GD03	32°41′18.16939″	0.3	119°19′42.80350″	0.3	17.113	0.7
GD04	32°41′15.33891″	0.2	119°19′38.63069″	0.3	17.656	0.6
GD05	32°40′11.38918″	0.2	119°18′36.99183″	0.3	18.167	0.6
GD06	32°40′00.12043″	0.3	119°18′30.20784″	0.4	18.376	0.9
GD07	32°37′35.08217″	0.3	119°15′12.47398″	0.3	28.221	0.9
GD08	32°37′21.85040″	0.3	119°15′09.24822″	0.4	29.196	1.0
GD09	32°35′19.95219″	0.3	119°15′00.80176″	0.4	38.311	0.9
GD10	32°35′11.11161″	0.5	119°14′57.00473″	0.6	39.502	1.6

用优化处理法进行自由网平差的结果 表 10.13

点名	纬度	中误差(cm)	经度(东经)	中误差(cm)	高程(m)	中误差(cm)
GD01	32°42′23.12667″	0.1	119°22′05.35876″	0.1	18.741	0.3
GD02	32°42′21.14147″	0.1	119°21′55.65561″	0.1	23.008	0.3
GD03	32°41′18.16926″	0.1	119°19′42.80342″	0.1	17.119	0.3
GD04	32°41′15.33874″	0.1	119°19′38.63060″	0.1	17.662	0.3
GD05	32°40′11.38911″	0.1	119°18′36.99477″	0.1	18.173	0.3
GD06	32°40′00.12038″	0.1	119°18′30.20781″	0.1	18.385	0.4
GD07	32°37′35.08234″	0.1	119°15′12.47404″	0.1	28.212	0.3
GD08	32°37′21.85062″	0.1	119°15′09.24829″	0.1	29.186	0.4
GD09	32°35′19.95248″	0.1	119°15′00.80184″	0.1	38.298	0.4
GD10	32°35′11.11187″	0.3	119°14′57.00497″	0.3	39.496	0.9

用常规方法进行二维约束平差的结果　　表 10.14

点名	X 坐标(m)	中误差(cm)	Y 坐标(m)	中误差(cm)
GD01	3620256.262	0.0	506390.443	0.0
GD02	3620194.945	0.3	506137.760	0.3
GD03	3618253.497	0.5	502678.085	0.4
GD04	3618166.273	0.3	502569.403	0.3
GD05	3616195.970	0.4	500963.932	0.3
GD06	3615848.813	0.4	500787.118	0.5
GD07	3611381.750	0.5	495632.842	0.5
GD08	3610974.176	0.5	495548.570	0.5
GD09	3607219.156	0.4	495326.616	0.5
GD10	3606946.866	0.7	495227.462	0.7

用优化处理法进行二维约束平差的结果　　表 10.15

点名	X 坐标(m)	中误差(cm)	Y 坐标(m)	中误差(cm)
GD01	3620256.262	0.0	506390.443	0.0
GD02	3620194.947	0.1	506137.759	0.1
GD03	3618253.502	0.2	502678.085	0.1
GD04	3618166.277	0.1	502569.403	0.1
GD05	3616195.976	0.1	500963.933	0.1
GD06	3615848.820	0.2	500787.120	0.2
GD07	3611381.764	0.2	495632.846	0.2
GD08	3610974.192	0.2	495548.574	0.2
GD09	3607219.173	0.2	495326.620	0.2
GD10	3606946.883	0.3	495227.470	0.3

从以上数据处理结果可以明显看出：优化处理法与常规法相比其结果精度得到了大幅度的提高.

10.3.5 RTK 技术在道路定测中的应用

(1)引言

RTK 是目前 GPS 应用中的最新技术，它是实时载波相位测量的简称。RTK 技术要求有一参考站，参考站放在坐标与高程已知的点位上，它包括 GPS 接收机及数据链发射电台，参考站不断接收卫星信号并把信号通过电台传输给它周围的用户，即移动站。一个参考站可服务于多个移动站，移动站由 GPS 接收机、数据链接收电台、手持计算机（它与一般的便携式计算机

不同，必要的应用程序固化在计算机中）等组成，电台负责接收由参考站发出的信号，该信息与移动站接收到的卫星信息进行相位差分计算，即可获得移动站的准确坐标并显示在手持计算机的屏幕上。RTK 技术在近几年逐步走向成熟并不断有新产品问世。利用 RTK 技术进行测量有如下优点：①具有 GPS 测量所共有的特点，如全球适用，不受气候、时间影响，不需通视。②可实时获得具有厘米级精度的点位坐标。以往都是通过后处理来获得厘米级的点位坐标，实时处理大大提高了作业的效率，并且保证了数据的质量，同时扩大了 GPS 应用的领域，比如施工放样等。③可在运动过程中连续高精度采样。

由于 RTK 技术只能把测得的坐标显示在屏幕上，它不能如常规仪器（经纬仪、钢尺等）标定方向、测量距离，虽然可以把一些整桩、关系加桩预先算出其坐标，然后按坐标去放样，但中线测量和单纯的点位放样不同，因为在中线测量过程中还会遇到许多地形、地物等加桩，需根据现场确定出位于中线上的特征点并定出其里程。要解决这个问题可根据设计数据把线路显示在手持计算机上，在屏幕上注明整桩及曲线主点的桩位，对于临时地形、地物加桩由于整个线路中线已显示在屏幕上，通过与接收机的点位坐标的比较便可找到位于中线上的地形或地物加桩，其里程可按一定的算法算出。因此首先需要根据设计数据连续计算线路上各点在线路坐标系中的坐标。其次，GPS 测量的结果是属于 WGS—84 坐标系的，要进行放样就需要把该结果转化到线路坐标系才能实时进行比较。另外，对于中线测量获得的结果需要进一步进行处理以获得中桩的高程。

（2）在定测中应用 RTK 技术

在线路初测时应首先建立控制网，一般应采用静态 GPS 定位技术建立首级控制，同时也建立了 RTK 作业的基准站网络，在沿线还应布设一些 GPS 水准点，以利于进行高程的转化。目前的 RTK 技术产品一般都具有坐标放样、直线及圆曲线测设等功能，因此能够进行定线工作。首先应在室内根据设计数据计算出各待定点的坐标，包括整桩、曲线主点、桥位等加桩，然后将这些数据送到手持机中，有了坐标以后在实测前还应作坐标转换参数的计算，以便把 GPS 测量结果转换到工程采用的坐标系统。有了转换参数便可在野外进行测设工作。1997 年 7 月 8 日在沈阳至山海关高速公路 K350 路段进行了定线测量的试验。当时该路段已进入施工阶段。具体步骤如下：

1）计算各待定点的坐标。根据线形设计数据及待定点的里程可计算出各整桩和加桩的设计坐标。一般用已有的成熟软件进行计算。试验时采用的坐标数据由辽宁省交通设计院提供。

2）将测设点的坐标输入到手持机中。设计坐标数据可由一定的软件输送到手持机中，也可由人工直接在手持机上进行数据输入，但人工输入工作效率较慢且容易出错，不适合于大量点的输入。由于试验时的数据量较小，因此采用人工输入。

3）转换参数计算。首先确定采用哪些点进行转换参数的计算，这些点应具有线路坐标和 WGS—84 坐标，若没有 WGS—84 坐标，则可在野外利用 RTK 技术实时测得。试验时采用试验路段附近的四个线路控制点 TN706、TN707、TN708、TN709 进行转换参数的计算，这些点均进行过 GPS 测量。在标定线路时一般实时只考虑平面位置，即把平面和高程分开处理，平面采用平面转换的模型，后处理高程计算采用动态拟合模型。在各种 RTK 产品的手持机中一般都装有可进行转换参数计算的软件系统，试验时采用随机软件进行计算。

4）野外实测。野外实测时基准站可设置于视野开阔的已知控制点上，试验时基准站设置于 TN706，作好 GPS 接收机、数据链电台及电池等的连线工作，输入参考站的坐标及其它一些

设置参数后，启动基准站设备进入工作状态，数据链不断地发射校正信息，此时移动站可开始工作。移动站应从另一已知点出发，即先验证已知坐标、转换参数及参考站设置的准确性，然后测设各整桩和加桩的位置，在每次作业的最后应再次回到已知点上检查是否与已知数据相符，以保证实测数据的质量。试验时移动站从 K350 + 550 开始实测，在 K350 + 500、K350 + 550 上均未设置中线点，无法检校。在 K350 + 600 和 K350 + 700 上有比较准确的水泥中线桩，实测的点位与已有点位之差均在 2cm 内，精度较好。

为确定点的实际位置需要移动天线，在手持机上可给出需移动的距离或者南北向和东西向各移动多少，为在实际移动中能够准确确定移动的方位和距离应配合以手表式的指南针，也可采用一小钢卷尺为辅助工具，当与目标点在 1m 以内时选择两点观测，可得到两点与目标的距离，用小卷尺采用距离交会便可较准确地定出待定点的位置，再把仪器放置上面观测，确定是否准确。

利用 RTK 技术进行中线定测时，线路上的里程可按一定的算法算出。即首先计算至前一整桩的直线距离 S，然后根据程序计算该整桩加 S 处点的坐标 X_1、Y_1，进而计算距离 S_1，S_1 与 S 的差即为曲线长 S 处的弦曲差，该差作为第一次改正加到 S 中即可得到加桩的里程，若精度不够可再次趋近。对于横断面首先绘制其方向线，任一点的横断面与该点切线方向相垂直，因此是不难给出的，沿该方向线便可测绘横断面，避免了常规测量中曲线段横断面方向较难确定的困难，根据记录在手持计算机中的纵、横断面的数据导入道路 CAD 系统绘制纵横断面图，为施工数据提供资料。目前，RTK 产品尚不能很好地满足中线定测工作，有待于开发用于道路的专用的软件系统。

(3)展望

RTK 技术是 GPS 定位技术的一个新的里程碑，它不仅具有 GPS 技术的所有优点，而且可以实时获得观测结果及精度，大大地提高了作业效率并开拓了 GPS 新的应用领域。RTK 技术将在道路初测、定测、施工测量、竣工测量等领域发挥巨大作用，将给现行道路勘测手段及规范带来变革，当然 RTK 技术的应用还有待于一些应用软件的支持。同样 RTK 技术也有着其局限性及进一步需要解决的问题。首先它存在 GPS 定位的普遍问题，如信号遮挡、多路径效应等，另外它还有通讯问题，且目前 RTK 技术的价格还比较高，这些问题都会在一定程度上影响 RTK 技术的推广应用。

10.4 GPS 桥梁施工控制网

10.4.1 概述

随着我国国民经济的飞速发展和科学技术水平的迅速提高，各种新型的特大跨径桥梁正不断地建设，构成我国现代交通网络的新格局。例如，南京长江第二大桥，是一座主跨 625m 的斜拉桥(目前国内主跨最长，世界第三的斜拉桥)。正在修建的润扬长江公路大桥，其南汊为主跨 1490m 的悬索桥，其为同类桥梁中世界第一。准备建造的苏通长江大桥跨越 6km 以上的江面，将是我国跨越长江水面最大的第一特大型桥梁。这些新型桥梁的修建，对沟通大江南北，形成现代交通网络起着极为重要的作用，对国民经济可持续发展，具有十分重要的意义。

在现代新型、大型的施工及运营管理中，都需要进行高精度的测量工作，因此，测量工作的精度对保证大桥施工建设的高质量，对保证大桥长久正常运营起着极为重要的作用。主要控

制测量工作包括：(1)在勘测设计阶段，为测绘桥址和隧道地表的大比例尺地形图而建立必要精度的控制网；(2)在桥梁工程施工阶段，为施工建立必要精度的施工控制网；(3)在桥梁工程竣工后，为了监测工程建筑物的变形，亦需提供变形观测控制网。

以上三个阶段的任务，由于时间有先后，规模有大小，形式和精度要求也不相同，一般采用分别布网的方法，但布网的原则和方法是相仿的。GPS 用于测图控制网的建立，在技术上已相当成熟，这里不做介绍。有关桥梁变形观测控制网的建立可参看本章 10.2 节内容。目前国内已有不少单位在研究采用 GPS 技术进行桥梁变形监测。

桥梁施工控制网作为整个大桥建设的基础必须保证高精度与高可靠度，这种控制网的特点是：网点间边长较短，点位精度要求却甚高。过去一般采用常规的边角网，为了达到高精度与高可靠度，一是要考虑网形结构的优化，另外就是要花相当的工作量进行网的观测，特别随着桥梁的跨径越来越大，常规测量仪器在测程上也逐渐不能胜任，这就要求测绘工作者寻找新的工作方法。近年来，在越来越多的高速公路的兴建中，相继应用 GPS 定位技术来建立线路控制网。与常规测量方法相比，这项技术不仅显著提高了线路控制点的精度和可靠性，而且可大大提高速度及减少费用。这对于高速公路勘测设计和施工放样具有重大的现实意义。同样 GPS 用于桥梁控制网的建立也逐渐从最初的试验尝试到现在的普遍应用，取得越来越显著的成绩。如润扬长江公路大桥、南京长江第三大桥、苏通长江公路大桥、杭州湾跨海大桥等首级施工平面控制网的建立都采用了 GPS 技术，本节将以润扬大桥为例，说明 GPS 桥梁施工平面控制网的建立。

10.4.2 润扬长江公路大桥施工控制网的建立

(1)工程概况

润扬长江公路大桥位于长江下游镇江市与扬州市之间，是连接长江南北的又一特大桥。地理位置位于东经 119°19′～119°28′，北纬 32°00′～32°22′。大桥南岸与镇江市连接，北岸与扬州市连接，中间跨越世业洲。由于南北两汊将测区分为三段，设计大桥由两部分组成，南汊桥设计桥型为悬索桥，主桥长 1450m，主跨 1450m，设计桥面高程为 68.686m，北汊桥为斜拉桥，桥长 758m，主跨为 406m，两桥间在世业洲上以曲线高架桥连接，大桥全长为 4778 米。河海大学受设计单位的委托，承接润扬长江大桥首级施工控制网的建立工作。其中平面控制网采用 GPS 施测，要求最弱点点位中误差不大于 5.0mm，桥轴线相对中误差不大于 1/400000。整个工程分为几个阶段：设计大纲的编写与论证、外业选点与埋标、外业观测、内业数据处理以及技术总结报告的编写等，整个工程从 1999 年 3 月进场，1999 年 8 月进行了 GPS 观测，2000 年 1 月完成数据处理及资料整理工作。下面主要介绍几个关键技术。

(2)GPS 网的布设

1)GPS 网形设计

传统的平面控制网一般布设为测角网或边角网，一般以桥轴线为公共边布设成双三角形或双大地四边形。GPS 网的精度从理论上讲与点位无关，与观测时卫星的空间分布、接收信号的好坏、解算方法等有关，但考虑到目前常用的施工放样方法仍采用常规仪器，因此本次网形设计仍考虑到网形结构。经图上设计与现场踏勘，并考虑到润扬大桥的桥型，南北桥的首级施工平面控制网同时建立，布设成一个网，即外业观测、基线处理整个网统一完成，而坐标转换时，分别转换到各自的桥轴线坐标系，以满足桥梁设计与施工放样的需要，同时为了加强网的精度，便于以后利用常规仪器复测，控制网布设成以桥轴线为公共边的的双大地四边形形式，

并根据需要在大地四边形的外侧增设了一个控制点。该大桥由南北汊桥和中间（世业洲上）曲线高架桥三部分组成一座完整的润扬长江公路大桥，因此在世业洲上又增设两点使之构成三部分连在一起的一个整体的桥位控制网，以确保大桥三部分高精度的衔接。全网共包含19个点，最大边长2034.3m，最小边长249.8m，平均边长1142m，见图10.7。

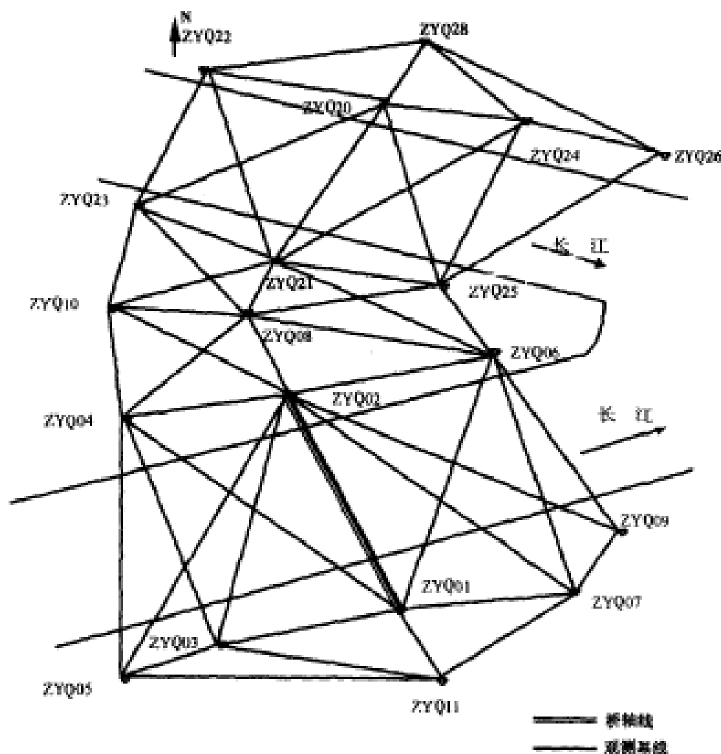


图10.7 润扬长江公路大桥首级施工控制网图

2)选点

桥梁平面控制网建立的目的是为了满足设计精度要求，定出桥轴线的长度及具体墩位的定位放样。因此所建网的目的是用于施工放样，所以选点时须同时考虑GPS观测与施工放样的要求，必须遵循以下原则：

①根据GPS观测要求，要减弱干扰，保证卫星信号的正常接收，确保观测质量，控制点要布设在四周开阔，在地面大于15°的范围内不得有障碍物，同时要减少多路径效应，控制点周围不得有强反射面，尽量避开高压线。

②由于所建控制网的目的是为大桥的施工放样服务，而施工放样目前所采用的仪器为常规测量仪器，因此仍需保证GPS点至少有两点直接通视。同时考虑到放样点与直接通视的GPS点构成的图形强度要好。

③为了提高网点的精度与可靠度，不允许出现支点。

④选点时应根据桥位准确估计施工区范围，控制点应尽量避开施工区，减少施工时网点的破坏。

⑤点位需布设在稳固且宜长期保存处。

3)埋标

为了提高平面控制的精度，减少对中误差，方便施工放样，对于平面控制点建立强制对中的钢筋混凝土观测墩，观测墩顶部埋设不锈钢强制对中基盘。

(3)GPS观测

1)GPS观测要求

平面控制测量采用三台由ASHTECH公司生产的Z—12型GPS接收机进行观测，并配备抗干扰良好的扼颈圈天线。观测前利用WINPRISM软件，编制测区卫星可见性预报表、卫星出现的方位等，结合观测要求(重复设站数)、各点的周围环境、交通状况等制定详细的工作计划、工作日程、人员调度表、观测要求一览表等。平均每天观测4~5个时段，共进行了9天观测，38个时段，其中10%为夜间观测，平均重复设站次数为4次。为了提高GPS基线解算的精度，在其中一个点上作了8小时的观测，并与上海天文台佘山基准站进行联测，以求得该点较精确的单点位置。作业方式采用静态相对定位模式，为了保证外业观测数据的质量，对GPS观测进行了严格控制，主要采取了以下措施：

①观测要求：卫星高度角$\geq 15°$，有效观测卫星个数≥ 5，采样间隔为20s，GDOP≤ 4，观测时间为120分钟；

②为消除相位中心偏差对测量结果的影响，安置天线时用罗盘定向使天线指北线严格指向北方；

③为了削弱电离层的影响，有4个时段在夜间进行观测；

④对讲机通话时远离站点；

⑤测前测后均精确量测天线高，认真核对，记人观测手簿；

⑥对每天的观测数据及时进行处理，及时统计同步环与异步环的闭合差，对超限的基线及时分析并重测。

2)联测

为了控制大桥两端与线路连接，应使桥梁控制网与两端线路所采用的坐标系一致，为此选取均匀分布在控制网不同部分的4个D级点进行联测，作为桥梁控制网转换为国家坐标系的起算点与校核点。联测点观测时采用经检校的光学对中器进行对中，并用天线杆从三个不同方向量测天线高，联测点重复设站次数为2，与其它施工控制点构成同步环与异步环。

3)边长观测

为了确定GPS网的尺度及对其进行检核，选择网中12条基线采用标称精度为$1\mathrm{mm}+1\mathrm{ppm}\times S$的TC2003全站仪进行对向观测，并进行气象改正，换算至墩面间斜距，观测的基线与GPS观测的基线进行了比较，结果显示二者相差最大值为3.6mm。

(4)GPS内业处理

1)GPS外业观测值的质量评定

为提高GPS测量的精度与可靠度，基线解算结束后，应及时计算同步环闭合差、非同步环闭合差以及重复边的检查计算，各环闭合差应符合规范要求。

同步环：同步环坐标分量及全长相对闭合差不得超过2ppm与3ppm。

非同步环：非同步环闭合差

$$W_x=\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i \leq 2\sqrt{n}\sigma$$

$$W_y = \sum_{i=1}^{n} \Delta y_i \leqslant 2\sqrt{n}\sigma$$

$$W_z = \sum_{i=1}^{n} \Delta z_i \leqslant 2\sqrt{n}\sigma$$

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \leqslant 2\sqrt{3n}\sigma$$

根据该网的精度要求，仪器标称精度为 5mm + 1ppm × S，D 为平均边长；n 为独立环中的边数，σ = 5.12mm，则重复基线的长度差规定不得超过 $2\sqrt{2}\sigma$ = 14.5mm

将每天的观测数据利用"Receiver Controller Software"软件下载到计算机内，然后利用 WIN-PRISM 软件进行基线解算，外业基线解算采用广播星历、相位观测值双差分技术，解算时数据采用率达 99%以上。每条基线都得到了固定解，表示精度的残差(RMS)均远远小于 0.01，满足规范规定的要求，表示固定解可靠程度因子(Ratio)除少数几个为 99 左右，均为 100，即固定解可靠度为 100%。本次共观测同步环 41 个，经计算坐标分量闭合差与环线闭合差均满足限差要求，坐标分量闭合差最大为 1.407ppm，环线闭合差最大为 2.192ppm，满足限差要求。小于 1/2 环线闭合差限差的同步环占 92%。统计三角形异步环 53 个，均满足限差要求，坐标分量闭合差不大于 $2\sqrt{n}\sigma$ = 17.7mm，全长闭合差不大于 $2\sqrt{3n}\sigma$ = 30.7mm，异步环坐标分量闭合差最大为 17mm，小于 1/2 坐标分量闭合差限差的闭合环占 85%，环线闭合差最大为 26mm。共观测重复基线 41 条，均满足限差要求，重复基线边长之差最大为 7mm，最小为 0.0mm，小于 1/2 限差的重复基线占 100%。由此可见整个 GPS 外业观测的质量是很好的。

2)GPS 控制网的数据处理

首先对单点定位点进行解算，利用从上海天文台下载的精密星历进行基线解算，联测基线长 212km，其单点定位解点位中误差为 ± 0.1756m。以该点的单点定位解作为已知点，利用 WINPRISM 软件及精密星历解算所有基线，然后利用同济大学研制的 TGPPS 软件包进行 GPS 网的平差、投影与转换。

①GPS 无约束平差

首先在 WGS—84 坐标系进行 GPS 网的三维无约束平差，再在高斯平面上进行平移、旋转变换，使 GPS 各网点纳入不同的坐标系。无约束平差选取 ZYQ01 作为三维平差的基准点，其坐标采用单点定位的坐标值，对全网进行三维无约束平差，得出各 GPS 点的大地坐标信息。其单位权中误差为 ± 0.2134cm，观测值各坐标分量改正数均不大于 3σ，即说明该 GPS 网的内部符合精度较好，外业观测成果可靠。另外将平差后的部分基线与全站仪测量的距离进行比较，GPS 边长相对于全站仪边长存在很小的尺度差，桥轴线相对精度很高，达到 1/106 万，远远高于所要求的桥轴线精度(1/40 万)。

②坐标转换

为了满足大桥不同部分的需要，需将三维平差后的平面控制点成果(大地坐标)转换为北京 1954 坐标系坐标(便于引桥与路的连接)和桥轴坐标系坐标(主要为大桥的施工提供放样基准)。

转换为 1954 北京坐标系坐标：取 3 个联测点作为坐标转换的基准点，以控制 GPS 网的尺度与方位，进行 GPS 网的约束平差计算结果显示其最弱点的点位中误差为 ± 3.7mm，满足最弱点点位中误差 ± 5mm 的要求，桥轴线长度相对中误差分别为 1/145 万与 1/59 万。

转换为桥轴坐标系坐标：取 x 轴重合于桥轴线，其正方向指向线路里程增加的方向，y 轴

与此垂直，其正向指向长江上游方向。给定一点的坐标如取轴线上某点的坐标固定，并固定桥轴线的方位角为0°，边长归算面为测区平均墩面，进行平差。

由此可见，利用GPS建立桥梁控制网无论从时间上还是从精度上，其效果都是显而易见的。另外，利用GPS技术监测大桥的运营、监测大桥受风等荷载影响的振动等已在香港青马大桥、虎门大桥中获得成功应用。相信GPS在桥梁方面的应用会有更加广阔的前景。

10.5 GPS在水下地形测量中的应用

10.5.1 概述

我国幅员辽阔广大，河川纵横，湖泊、水库星罗棋布，同时海岸线漫长，水利、海洋资源的开发和建设已成为经济建设中的一个重要方面。水下地形测量是水利工程测量、海洋测量的一个重要组成部分。海上航运、海洋渔业资源的开发，沿海地区养殖业、海上石油工业以及海底输油管道和海底电缆工程，还有其它海洋资源的勘探与开发，水下潜艇的活动等等都离不开水下地形图。随着GPS实时定位技术的出现和应用，为水下地形测量开创了一个新局面。

水下地形测量包括水深测量和平面位置测量。

水深测量通常是采用砣测、绳测、杆测或回声测深仪进行的。在测量水深的同时通过潮位观测站进行潮位观测，用于改正水深测量值，最后成为水下地形图的高程值。

平面位置的取得，以往是采用六分仪后方交会、经纬仪前方交会、红外测距仪三边交会、微波定位系统等方法来进行，但这些测量方法对工况要求高、操作复杂、劳动强度大、自动化程度低，较大程度上影响了出图的精度及时间。而GPS卫星定位技术的应用，可以快速高精度的测定水声仪器的位置，对于较大比例尺测图，可应用差分GPS技术进行相对定位，因此，采用差分GPS可以从根本上克服传统方法的诸多缺点。

实际应用中将GPS接收机与水南仪器组合，前者进行定位测量，后者同时进行水深测量，再利用电子记录手簿，利用计算机和绘图仪便可以组成水下地形测量自动化系统。近十几年来在国内外均有多种自动化系统成品生产。如美国的IMC公司生产的HydroI型自动定位系统，野外有两人便可完成岸上和船上的全部操作。当天所测数据1~2小时可处理完毕，并可即时绘出水深图、测线断面图、水下地形模型等。

1992年，我国大连舰艇学院研制成功了HSD—001型GPS海上动态测量定位系统。该系统是由GPS接收机、差分基准台、无线电传输设备和一系列软件组成。一个基准台可供任意个船台进行差分定位。基准台的作用是向船台发送一系列差分定位改正数。船台上启动微机工作软件后，根据不同的定位方式，对GPS接收机的各种状态自动进行设定，不断收集GPS接收机中的测量数据，对来自基准台的差分数据，可自动收集并更新数据。船台软件还可按计划进行导航。该系统在南海进行水深测图，比单点定位精度提高约10倍，可以满足海上较大比例尺水下地形测量、海上工程勘察、海洋石油开采以及海洋矿藏开发等方面的需要。

10.5.2 水下地形测量系统简介

将差分GPS、测深仪以及其他终端设备结合起来，就构成了一套完整的水下地形测绘系统（见图10.8），能应用于一切航道、海港等领域内的各种测量作业。

现以美国Motorola公司生产的差分GPS结合其水道测量软件，对差分GPS在水下地形测

量中的应用作简要叙述。表 10.16 为该软件的主菜单(中文含义)。

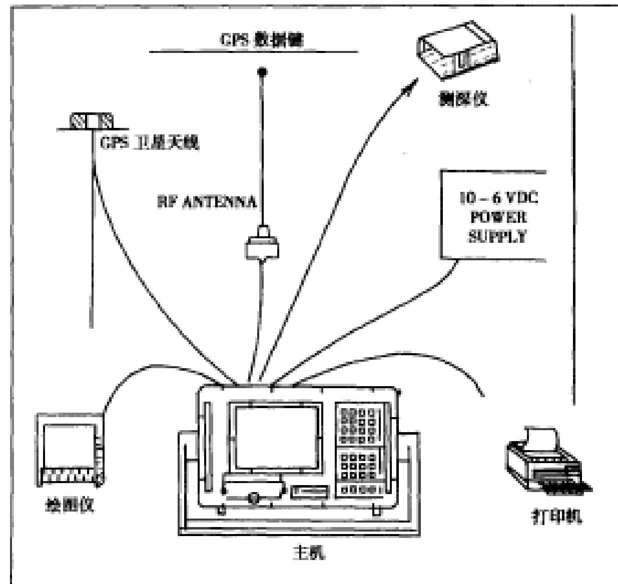


图 10.8　水下地形测绘系统

测量主菜单　　表 10.16

测量	数据处理	设置	绘图	数字化	大地测量
航道设计	数据编辑	色彩设置	批量绘图	数字化水深	天体方位计算
设计	边缘	数据路径	1 断面	数字化岸线	坐标系转换
数据转换	轮廓	数字化仪	2 断面	人工输入岸线	极坐标转换
数据传输	数据压缩	语言选择	绘图	人工输入目标	大地参数设定
接口测试	格式转换	菜单色彩	绘图文件		坐标转换
导航	文件管理	屏幕选择	覆盖块		点位计算
软件设计	水深预排序	绘图仪选择	新建绘图文件		装载测量参数
测量	排序	接口设置	断面模型		测量单位转换
航迹	声速改正				
视图	潮汐				
退出	人工潮汐				
	图示潮汐				
	土方计算				
	文件组合				
	文件集合				

差分 GPS 水下地形测量工作主要分为三部分：测前准备、测量作业和内业处理。

(1)测前准备

测量工程师根据测量任务书要求在进入测量工地前，必须完成测量线设计、输入；测量地区大地参数修改；导航文件、绘图文件、测区设置文件的建立等工作(见图 10.9)。

1)测量线设计输入

根据技术规范要求，在已有图籍资料上设计测量断面线(测量线)应尽量与航道(或深槽，

或岸线)垂直布置(见图 10.10),并量出设计线的起止点的坐标值,如水道顺直,则需量 1 个断面起止点的坐标值即可,然后在输入时选用平移的方式产生同样断面间隔的测量线,该软件亦可根据水道情况产生阶梯式测量线、幅射状测量线、搜导式测量线、中心测量线等,最后产生测量线文件。

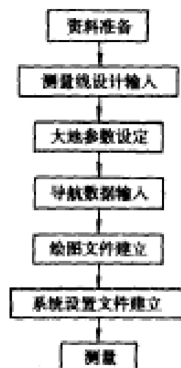


图 10.9 测前准备

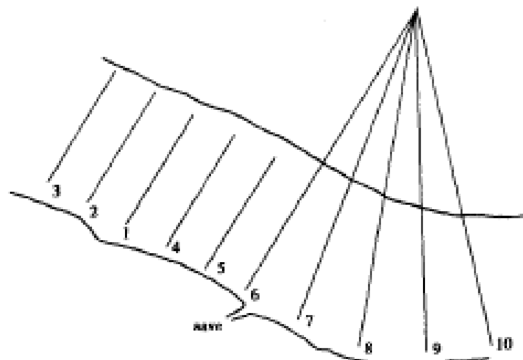


图 10.10 垂直布置的测量线

2)大地参数修改

大地参数的选用对测量结果起直接作用,因此,每接到一个新任务,每到一个新的测区,都得根据测量任务的要求修改大地参数,一般要对坐标系统、投影方式、测量单位、测区所在半球位置、椭球体参数五项进行修改(见图 10.11),修改后参数存在软件的大地参数文件中,为测量时调用。

坐标系统	投影选择	球体位置	
AIRY	ENGINEERING	* NORTH	
MOD. AIRY	LAMBERTOC	SOUTH	
AUSTRAL. NAT	MERCATOR		
BESSLL1041	TRANSVERSEMERCATOR		
CLARBE1866	UENATIONALGRID		
CLARBE1880	* UTM		
EVEREST	RIJKSDRIEHOER		
MDDEVEREST	IRISHNATIONALGRID	椭球体参数	
FISGHER1968		A:	6487245.0000
GRS - 1967		B:	6356863.0190
GRS - 1980		1/F:	298.30000000
HELMERT1986	测量单位	C: MERIDTAN:	123.00000000
HOUGH	U.S. SURVEYFOOT	SCALEFAC.:	1.0000000000
INTERNATIONAL	INTERNATIONALFOOT	NORTHPAR.:	0.000000000
* KRASSOVSRY	* MEITERS	SOUTHPAR.:	0.000000000
SA - 1969		REF. LAT.:	0.000000000
WGS - 60		FALSEEAST:	500000.0000
WGS - 66		FALSENORT:	0.0000
WGS - 72			
WGS - 84			
SAVE DATA: Y/N		OUTPUT TO PRINTER QUIT	

图 10.11 大地参数的修改

3)导航文件

集导航系统的使用情况、校正系数、船台通讯机与离线的偏距和其他测量信息的数据在一起组成测量程序使用的导航文件(见图 10.12),用户可根据测量任务书要求对各项目进行修改。

导航参数设置	
距离门限值：	250.00
屏幕更新点：	20.00
标记点增量：	1.00
测量开始门限值：	30.00
测量船天线高度：	20.0
导航系统数量：	1.00
离线距离说明：	100.00
船台通讯机深度：	0.00
通讯机偏前距离：	0.00
通讯机偏左距离：	0.00
测量船大概位置 X：	0.00

图 10.12 导航参数设置

4)绘图文件

根据测区需要制作图幅的大小、起点(左下角)坐标、绘图比例、图纸旋转方位、绘图选择等绘图参数,在程序中生成绘图文件供水深测量现场用和后处理时制图用(见图 10.13)。

5)设置测量文件

将需要测量的水道名设为设置文件名,然后将为测量该水道所准备的导航文件、绘图文件、测量线文件和导航系统、测深仪类型以及是否连接打印机等集合成测量设置文件,供水深测量时使用(见图 10.14)。

(2)测量作业

测前准备工作完成之后,便可以进行水深测量作业。水深测量作业亦是时间、位置、水深等测量数据的采集工作。测量程序是一个功能十分强大的上线指导和数据采集程序,它能够利用不同类型的导航通讯接收机,提供精确的位置信息,能够计算出多种椭球体和投影下的位置数据,还能支持不同类型的回声测深仪。在测量数据不断采集,不断存盘的同时,系统还同时向测深仪、绘图机、打印机、导航仪等发出标记、跟踪、动作信息以及屏幕输出测量信息(见图 10.15)。

绘图文件设置		
绘图选择		方位选择
1——航迹线		1——垂直航迹(右边)
2——水深		2——垂直航线(底部)
3——航迹和水深		3——定位角度
		↓ 下移
		↑ 上移
绘图长度(X 轴)：	70.00cm	ESC 退出
绘图宽度(Y 轴)：	50.00cm	
起点 东(X)：	576000.00	文件名：HAL.PLT
起点 北(Y)：	6222500.00	
绘图比例：	10000.00:1	[绘图机设置]
旋转角度：	0.00	语言：DMP/L
绘图选择：	1.00(水深)	步长：0.025MM
水深间的距离：	50.00cm	波特率：9600
水深方向选择：	1.00	奇偶校验：无
绘制水深角度：	315.00	数据位：8

图 10.13 绘图文件设置

测量文件设置	
设置文件名：	HAL.SET
导航文件名：	HAL.NAV
绘图文件名：	HAL.PLT
测量线文件名：	HAL.LIN
海岸线文件名：	HAL2.DIG
潮汐文件名：	NONE(无)
测量数据文件名：	HAL（NAME）
测量数据文件格式：	ALL(全部)
打印机状态：	EVENTS(特征点)
数据采集模式：	NORMAL(一般方式)
定位导航系统：	MOTOLA SIXGUN
回声测深仪型号：	DIGITECE.01RES(无锡产)
测量点采集方式：	DISTANCE(航行距离)
左/右事件：	AUTO NONE(自动方式)

图 10.14 测量文件设置

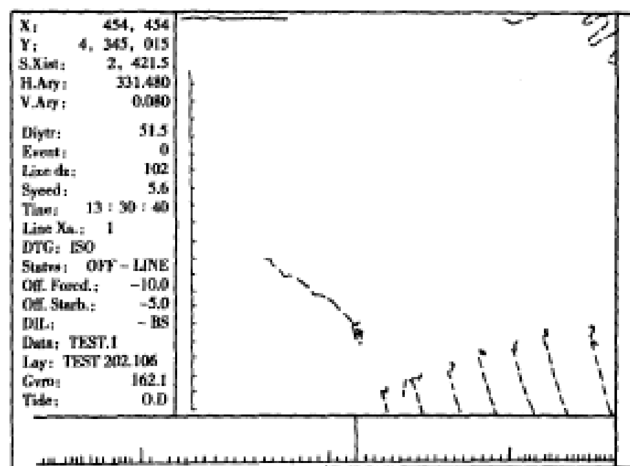


图 10.15 屏幕显示图

测量员可通过使用功能键控制操作参数(见图 10.16)。

其中常用功能键有：

S：该键用于人工开始测量线的测量(在线控制)。

E：该键用于人工控制结束测量线测量(离线控制)。

L：该键用于强行激活当前测量线。

N：该键用于在“在线”状态下人工干预标记点(特征点，如航标等助航设施的定位等)。

+：使电子海图比例尺缩小 30%，屏幕图形扩大。

-：使电子海图比例尺增大 30%，屏幕图缩小。

O：该键用于输入新增加的测量线(设计除外)的 X、Y 坐标，操作员可在测量现场根据工作需要增加测线。

#：该键用于在测量跟踪屏幕上设置或消除目标。

M:该键用于显示可用键盘中所选择的菜单。测量员可以通过按“M”键所得到的键功能来进行您需要的操作。

测量跟踪时操作代码参考			
↑:屏幕上移	L:改变测量线号	/:打印机开关	HOME:将船位于屏幕中央
↓:屏幕下移	M:激活测量菜单	\:TURBO方式开关	CTRL+A:显示稳定航向
←:屏幕左移	N:人工定位标记	.:设置目标	CTRL+B:显示测量船
→:屏幕右移	O:新增测量线	!:改变绘图机型号	CTRL+F:延长在线时间
A:改变绘制水深角度	P:暂停程序运行	@:海岸线调入或消除	CTRL+G:人工输入航向
B:响铃开关	Q:退出测量程序	#:人工输入目标	CTRL+M:屏幕扩大300%
C:左右指示仪比例	R:整理屏幕	$:改变测量仪型号	CTRL+P:屏幕缩小300%
D:改变距离门限值	S:人工在线	^P:缩小屏幕比例	CTRL+S:改变屏幕纵横比
E:手动离线	T:查看内存空间	%:改变天线偏距	CTRL+T:画航道模型
F:改变定位点号	U:+0.1吃水修正	^:接收转换点文件	CTRL+V:显示测量船航速
G:改变上线门限值	V:−0.1吃水修正	*:定位系统转换	CTRL+X:验证GPS数据
H:测量船更新位置	W:调头测量开关	+:缩小屏幕比例	4:改变船用天线高度
I:键盘开关	X:增大指示仪比例	−:扩大屏幕比例	3:改变测量线序号增量
J:改变标记点增量	Y:+0.1修正水深	[:用于标记点的海岸	2:改变标记点序号增量
K:修改指示仪比例	Z:−0.1修正水深	=:改变测量线增量	1:连接KLEIN595扫描仪

图10.16 屏幕功能显示

(3)内业处理

内业处理称后处理，由数据编辑和绘图两部分组成。

1)数据编辑

测量外业数据采集完成后，我们就通过数据编辑软件将外业数据调出并修正满意后，建立一个新的文件来存储这些数据。我们在数据编辑中，可通过非常直观地用电子表格(图10.17)、图形修改(图10.18)、重新计算坐标等修改方式进行数据修正，并可调人潮汐资料来修改水深随后将数据存储起来。

TIME	POS	RAW	CORRECTIONS			POSITIONS	
HHMMSS	#	DEPTH	ZERO/SV	TIDE	DRAFT	X	Y
143223	1	63.5	0.0	−2.5	0.0	454636.60	4944749.54
143225	1	63.7	0.0	−2.5	0.0	454,640.13	4,944,743.85
143225	1	63.8	0.0	−2.5	0.0	454,642.87	4,944,739.43
143226	1	63.9	0.0	−2.5	0.0	454,645.66	4,944,734.93
143226	1	64.1	0.0	−2.5	0.0	454,645.69	4,944,728.83

F1 MANUAL　F2 FILE　F3CALC　F4MERGE　F5VIEW　F6PRIN　F7SAVE　F8TIDE　F9STATS

图10.17 电子表格

2)绘图

其主要功能是将测量外业采集的测量点数据文件，通过数据编辑、潮汐改正后，根据测量任务要求绘出所需要的图纸来。其主要步骤是：

①先对测量跟踪用绘图文件进行修改(图10.13)，将绘图选择修改为“2”。

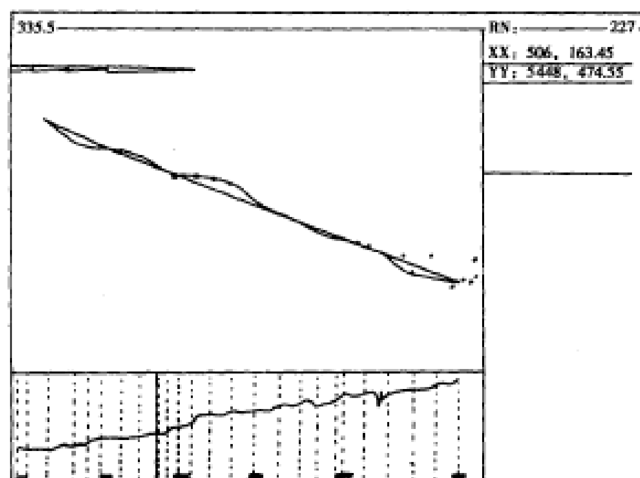


图 10.18　图形修改界面

②先进人数据编辑栏，按测量图纸比例对外业的测量数据进行测量数据编辑（图 10.18）和测量点排序。

③调出潮汐文件与排序后的水深组成一个水深值改正后测量数据文件。

④对水深改正后的文件进行数据格式转换（转换成 CAD 能接收的格式）。

⑤根据测量任务要求绘制出您所需要的图纸来，软件可以绘出测量航迹图、航迹与水深组合图、水深图或绘出投影坐标图（图 10.19）与地理坐标图。

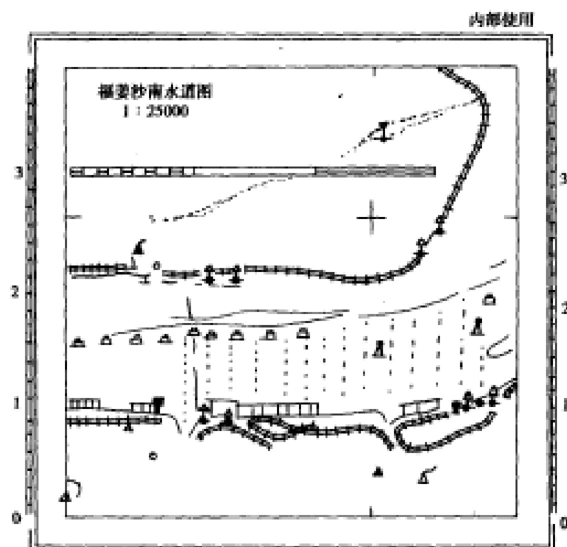


图 10.19　投影坐标图示例

10.5.3　RTK 技术在水下地形测量中的应用

（1）工程实例

密云水库建于1960年，为华北地区第一大水库，是北京市重要的生活工业水源。为保证密云水库运行安全，顾及首都及密云水库下游地区人民生命财产安全和社会稳定，北京市政府决定对密云水库存在安全隐患的坝区进行安全加固。为此，须进行密云水库潮河库区野外高密度地震影象测试工作，并提供高精度水上导航，为密云水库潮河主坝及九松山副坝加固工程和施工监测提供设计依据。测试的目的和任务是了解测区内淤泥分布的情况和厚度，抛石料的分布情况和厚度。测区位于东经40°26′50″至40°27′00″，北纬116°58′25″至116°58′35″。在大坝上有已知北京地方坐标和北京54坐标的2个已知点。库区水位150m，水深在20～50m左右。

(2)系统构成

清华大学GPS应用研究室研制了一套水上导航和与声纳结合水下地形测量系统。GPS接收机采用NOVATELRT－2接收机，该设备具有RTK功能，通讯频率400MHz，定位输出率4Hz。导航设备是清华大学研制的导航仪，主机由一台PC/104486级工控机和LCD显示器构成，体积小、可靠性高，适合于野外恶劣环境和空间较小的船只。导航设备及SWS－1G型多功能面波仪安装在快艇上(流动站)，快艇拖拽电动震源船的拖鱼(内置300Hz检测器、10KHg水听器)。NOVATELRT－2GPS接收机在卫星情况良好，多路径效应不强的情况下，初始化只需两分钟左右。该软件具有以下特点：

1)提供全中文界面，操作方便；

2)有手动和自动两种导航方式，操作灵活；

3)每个航区最多可置300条航线，航区可多至10个，也可根据实际情况增减；航线文件的编制简便易行；

4)航线自动采用递增或递减方式载人；一条航线往往很长，屏幕可滚动显示航线；

5)实时显示航偏距、航偏角、经度、纬度、航线号等必要信息，辅助导航；

6)远距离导航可在左上角显示大比例尺航线及流动站的位置，有利于驾驶员了解自己所处的位置；

7)比例尺自动切换：在远离航线时用小比例尺，在进人航线时用大比例尺，保证流动站始终在导航屏幕上出现。

(3)测试及结果处理

本次测试共完成潮河主坝平行坝轴线纵剖面(简称纵剖面)3条，垂直坝轴线横剖面(简称横剖面)24条；九松山副坝纵剖面1条，横剖面5条。此次测量因为用户要求达到亚米级精度，所以使用RTK是合适的。

实测时，导航人员、测试人员密切配合，尤其是挑选了最好的驾驶员，使测量工作快速、高质量完成，测试人员对导航效果表示满意。

事后对流动站轨迹进行处理，绘制了航线图和轨迹图，并向测量人员提供了所有轨迹的XY坐标，便于他们处理面波仪记录的数据和测图，达到预期的目的。

(4)展望

利用GPS实时载波相位差分(RTK)技术进行水上定位导航具有很大的优越性，实现了高精度(＜1m)，快速进行平面位置测量，具有推广价值，尤其是在内陆水域及近海的水下地形测量上应用前景良好。但是，还有很多问题需要进一步讨论、研究，例如：

1)导航软件记录数据与测深仪发生探测脉冲时刻同步的问题；现在的软件还需要人工干预，如何实现自动同步值得探讨；

2)由于流动站本身处于运动状态,运动速度有快有慢,水深值也不是固定的,如何将 GPS 定位数据与测深数据很好地匹配起来也是今后需要解决的问题。

10.6 GPS 在船舶进出港口中的应用

随着我国正式加入 WTO(世界贸易组织),进出口贸易会不断发展,航运事业也将相继发展。目前我国自己制造的远洋船舶不断增加,世界各国的船舶也大量驶入,因此,这些船舶进出港口的导航安全就十分重要,特别是在航道狭窄和能见度很低的气象条件下,更显得重要。所以,在当今港口建设中,建立差分 GPS 导航和引航系统是十分必要的。

在进出港口时,由于有限的航道和有限的间距,尤其是船只交会的时候,要使导航精度满足避免浅水搁浅和防止其它船只相撞。根据特定的航道形状,通过直道和转弯时不能掉头,因此必须保持导航精度 10m。为了安全导航,驾驶员需要有连续、精确的横向偏离信息。船舶进出港口的最低导航精度如表 10.17 所示。

船舶进出港口导航精度　　表 10.17

要　求	满足要求的最低性能指标					
	精度 2drms	覆盖	可用度	定位速率	容量	单值性
大船和拖船	8~20m	海港附近	99.7%	6~10s	无限	99.9%
小船	视港口而定	海港附近	99.7%	15s	无限	99.9%
渔船、游船	视港口而定	海港附近	99.7%	30s	无限	99.9%

从表 10.17 可以看出,考虑到船体宽度和航道宽度两者的关系,船舶进出港口的导航精度要达到 8~20m。很显然,利用商用 GPS 接收机是不能达到上述精度要求的,于是差分 GPS 定位技术便在船舶进出港口导航中发挥了重要作用。

如图 10.20 所示,在港口调度室建立差分 GPS 基准站,随时发送差分改正数。进出港口的船舶上安装能接收差分信号的 GPS 接收机,就可以实时地高精度地显示自己的位置。

在设计适用于进出港口的接收机时,必须考虑要具有下述功能:

1)添加港口水域图显示系统。将港口附近水域、地形地貌等要素以 1:50 万、1:10 万和 1:5000等比例尺编成数字地图,储存在微机中,根据需要可随时调用各种比例尺的地形图,将船舶的位置显示在显示器上。

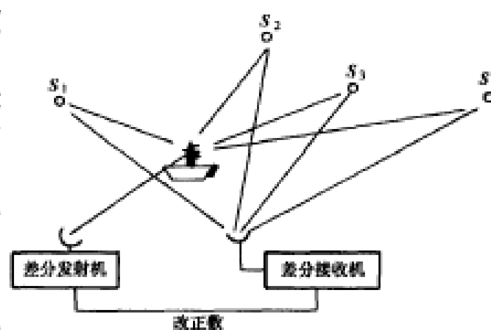


图 10.20　差分 GPS 用于船舶进出港导航示意图

2)改进数据处理系统。GPS 接收机接收到卫星信号和差分信号后,输出的是地心坐标,必须将其地心坐标转换成为我国采用的北京—54 坐标系中的高斯平面坐标。这种坐标才能与上面港口附近的地形图联系起来,形成统一的航行图。

3)预置航线和航路。根据港口和航道划分,将港口分区,将航道分线,标出航道编号。由调度将准许航行的航线和进出港口泊位编号,告知该船并在该船的航行图上显示出来。

4)计算偏航值。由计算机计算出船舶所在位置与标准航线的偏离值,并给出校正航线的

方向和大小。

5)控制测深仪。为避免搁浅、触礁，了解航道水下的状况，船舶均设置有测深仪。计算机控制测深仪的自动定标、开关时程转换及自动报警等功能，并将有关信息在显示器上显示出来。

6)存储记录。将以上各种信息全部存储进来，供港口或施工部门检查。管理部门事后将此航行数据调出，显示该船的船迹图及航道边线，这对分析港口航行事故作出正确判断有很大的帮助。若用于港口和航道疏浚，则对判断挖泥船的开掘准确率，计算平均挖泥覆盖次数，提高挖泥效率有很大帮助。

7)监视系统。设立电台将船舶的位置实时地发送到调度室监视屏，从调度室的监视屏上可查看进出港的情景。

利用差分 GPS 进行船舶进出港口管理无疑具有极大吸引力。该系统功能强大，以高精度定位出所在地形图和本身的位置，能根据需要选用不同的比例尺，对船位和附近的情况进行显示；该系统直观方便，使引航员能准确知道自己的位置和航行趋势；该系统是全天候的，能在能见度很低的雾天条件下正常工作，这是过去目视导标引航所不及的。

10.7 GPS 在智能运输系统(ITS)中的应用

20 世纪 90 年代兴起的智能运输系统，正日益受到人们的关注，并已逐步应用到交通、测绘、导航、公安等众多领域。

(1)国外的应用情况

1)在美国

目前，ROCKWELL 公司正将 GPS 纳入到交通电子产品中。1994 年与 1995 年在 OLDSMOBLE88 车中采用 GPS 处理器，提供包括驾驶员导航系统的硬件设备。该系统仅要求驾驶员用车辆控制台上的按钮输入其目的地，系统即可计算出到达目的地的最短路径，并用语音在车辆每次转弯前提示驾驶员。接着该公司又进行 PATHMASTER 车辆导航项目。这是一个最先进的转弯接转弯式导向和信息系统。该系统包括驾驶室的小型彩色屏幕，一个 CPU、方向传感器、卫星接收机和 GPS 天线。系统具有最有效的道路选择功能，转弯接转弯的转向功能，车辆精确的定位功能，驾驶员不断观看道路的语音提示功能，以及为驾驶员提供当地服务设施及景点位置的菜单。

ROCKWELL 公司利用 GPS 还开发了 PLO200SL 车载通信系统、FLEETMASTER 自动车辆定位系统(AVLS)。采用 FLEETMASTER 自动车辆定位系统装备的车辆能获得道路信息、路况信息与获得实时交通控制。

2)北美、日本和欧洲

基于 GPS 的智能地理信息系统(GIS)，在欧洲已广泛用于车辆导航的车辆控制中。德国豪华轿车也已安装 GPS 车辆自动导航系统。

在世界的汽车自动定位导航系统中主要有五种，即自动系统、顾问导航系统、库存系统、车队管理系统、便携式系统。

①自动系统：所谓自动系统，就是在独立的车辆上装备地图数据库和定位仪器的系统。汽车不同外界发生通信联系。

②顾问导航系统：有通信联系的自动系统即是顾问导航系统。其车辆接收控制中心发来

的交通与气象等实时信息报告，经差分校正的GPS信号以提高车辆的定位精度。

③库存系统：在库存系统的车辆上，装备有视频或数字摄像机，以捕捉空间坐标标记或时间、位置信息等，借以自动完成车辆的自动定位与导航。库存系统的车辆与控制中心可以进行通信联系。

④车队管理系统：车队管理系统是由一队与管理控制中心联络的车辆群组成。车辆上装备定位传感器。控制中心把信息从数据库传送给车辆，车辆与控制中心可用数字与声音等方式进行联系。

⑤便携式系统：无线、小型、功能集中的车载设备是当前发展最快的一种系统，也是将来的发展趋势。将来，在低轨卫星上只要用低能量驱动的接收发送器，就能实现全球范围的轨迹跟踪。

北美、日本和欧洲是智能交通管理发展较早、较快的地区。根据世界智能交通管理系统定位和导航的有关资料，1970～1995年上述三地汽车自动定位与导航系统的类型及其应用可参见表10.18。

汽车自动定位和导航系统类型及应用　　表10.18

系统种类 / 地区或国家	自动系统	顾问系统	库存系统	车队管理系统	便携式系统	合　计
北美	20	7	36	86	26	175
日本	36	27	1	1	3	68
欧洲	15	14	2	30	3	64

由表10.18可见，由于不同地区或国家的社会、政治和经济特征不同，所以采用解决各自的汽车自动定位与导航问题的方法也不同。

(2)我国的应用情况

目前，智能运输系统在中国众多地区或大城市已着手研究与实践，随着GPS卫星导航定位技术与无线电通信网络的发展，基于GPS的车辆导航与车辆运营管理系统等也正在迅速发展。

1)利用GPS实现的车辆导航系统

由图10.21所示，基于GPS实现的车辆导航系统由GPS接收机、微处理机、车辆导航软件、显示器、地理信息系统组成。

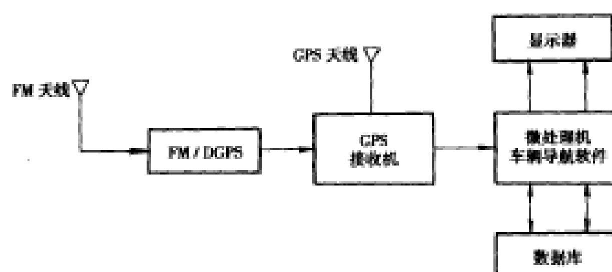


图10.21　车辆导航系统

GPS接收机可通过同时接收四颗以上卫星信号，确定三维坐标，用以确定车辆位置。车辆

导航软件用于整个系统的数据处理和管理。显示器可用于车辆运行情况的实时显示。地理信息系统用于存放地图和有关导航信息。

车辆导航系统具有如下功能：

①查询：车辆导航系统能提供停车场、主要旅游景点、宾馆等数据库，以供用户查询，并可在电子地图上显示其位置。查询资料可以语音和图像的形式显示。

②跟踪车辆位置：车辆导航系统可以跟踪移动目标，并使目标始终保持在屏幕上。电子地图可以显示车辆的实际位置。电子地图可任意缩小、放大、还原及换图等。

③行车路线设计：车辆行车路线设计可以分为人工设计和自动设计两种。所谓人工设计路线，即根据驾驶员要到达的目的地，自行设计行驶路线的起点、终点和途经点等，自行建立路线库。所谓自动设计路线，即驾驶员确定路线的起点、终点和途经点等，由软件自动按最短行驶路线设计行车路线，建立路线库。

④按设计的行车路线导航：在电子地图上显示所设计的路线，同时显示汽车运行方向与运行路径。汽车运行路线可以记录保存，以便事后回放。在运行路线导航中，同时显示车辆所在位置的纬度和经度，以及到达下一个目的地的剩余距离。

2)利用 GPS 实现的车辆运营管理系统

车辆运营管理系统主要是为了使车辆运营管理部门、安全保卫部门及时掌握车辆的运行状况以便对车辆进行指挥调度，同时为驾驶员提供交通、公安和服务信息。

车辆运营管理系统是由 GPS、GIS、无线电通信网络、多媒体、遥测遥控集成为一体的一种新型车辆运营管理系统。图 10.22 所示为车辆运营管理系统框图。

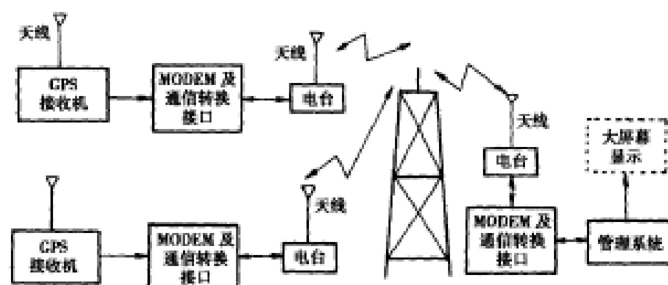


图 10.22　车辆运营管理系统框图

根据不同要求，本系统管理的车辆可安装车辆导航系统，也可以只装 GPS 接收机，以提供车辆位置信息。

车辆监控中心有多台微型计算机、一台工作站与大屏幕显示器。为了对车辆进行监测与管理，在计算机内装有城市道路信息库、车辆运行状态监测软件、重要车辆运行路线优化设计软件、车辆运营调度管理系统软件、车辆报警紧急处理软件等。

车辆运营管理系统具有如下功能：

①查询。控制中心利用监控台可查询系统内任意目标所在的位置。在大屏幕电子地图上以数字形式显示车辆的速度、方向及其所在位置的经度、纬度以及距到达目的地剩余距离等信息。

②系统大屏幕可实现多视口开窗。多窗口可同时监视多辆车运行，并可显示和存贮车辆的运行轨迹，以供运行评估，进行指挥调度。指挥中心随时可同跟踪目标进行通话，话务指挥与车辆跟踪相结合，实行现代管理。

③指挥中心可监视车辆的运行状况，采用最佳设计软件，对车辆进行指挥调度。指挥中心随时可同跟踪目标进行通话，话务指挥与车辆跟踪相结合，实行现代管理。

④系统对车辆实行分级管理体制，对不同优先级分配不同时间。监控台对有险情或发生事故的车辆发出求救信号，并采用电子地图显示和声光报警，进行优先处理。

由于GPS定位精度高，定位速度快，而且价格便宜，因此已被人们所重视。随着我国现代化进程的加快，智能运输系统将在现代化交通工程中发挥越来越重要的作用。

10.8 GPS在其它领域中的应用

10.8.1 GPS在地球动力学及地震研究中的应用

(1)概述

GPS在地球动力学中的应用，主要是用GPS来监测全球和区域板块运动，监测区域和局部地壳运动，从而进行地球成因及动力机制的研究。根据测定的板块运动的速度和方向，测定的地壳运动变形量，分析地倾斜地应变积累，研究地下断层活动模式、应力场变化，开展地震危险性估计，做地震预报。武汉大学测绘学院利用云南滇西两期GPS监测资料，反演红河断裂带地下断层活动模式，对1996年云南丽江地震作了较为准确的中期(1～3年)预报，其位置误差为27km，震源深度误差为6km，震级完全准确。揭示了用GPS监测资料做中期地震预报的可能性。

目前用GPS来监测板块运动和地壳形变的精度，在水平速度上可达2mm/年，水平方向形变可达1～2mm/年，垂直方向可达2～4mm/年，基线相对精度可达10^{-9}。这一精度完全可以用来监测板块运动和地壳运动。

(2)中国地壳运动监测网

中国地壳运动监测网已经建立，在全国分A、B、C三个层次。

A级网，边长50～100km，1～2年监测一次，用于研究区域应变模型。

B级网，边长15～25km，每年监测3～4次，用于研究特定断层活动特征。

C级网，边长为5～10km，点位根据A、B级网监测结果分析后设定，进行连续实时监测，15～30分钟完成监测数据的传输和处理，进行地震预报。

(3)首都圈GPS地表形变监测网

首都圈(北纬38.5°～41.0°，东经113.0°～120.0°)是中国东部新构造最强烈的地区，曾发生过强烈地震10多次(如1976年的唐山大地震)。根据专家预测，今后20年，有可能再发生中强地震。为监测首都圈地震，1994年通过专家论证，决定建立首都圈GPS地表形变监测网。全网共57个GPS监测点，点距为50～100km，控制面积约为15万平方公里。计划每年复测一次。对应力集中地段，点位再加密20～30km一个点，每年测2～4次。预期监测的相对精度优于5×10^{-8}。

(4)龙门山GPS地壳形变监测网

由中、美合作的龙门山GPS地壳形变监测网，位于我国西南地区，横跨四川省、云南省，东西宽约500km，南北长约1000km，该网布设13个GPS监测站(每个站由一个主点，三副点组成)点距为42～250km。已于1991年、1993年、1995年进行了三期观测。解算采用GAMIT软件，解算结果三期基线长变化量为0.9～6.5cm之间，相对精度优于1×10^{-7}。

(5)世界各地GPS地壳运动监测网

1990年，联合国发起了国际十年减灾计划，许多国家利用GPS建立了地壳形变监测网，以监测地面的变形、地震的活动、火山的喷发等，为减轻这些自然灾害的影响提供了必要的数据。日本是个多地震国家，它在全国范围内共布设有1000多个GPS观测点，为日本的地震预报提供重要的研究数据。意大利已布设了地壳运动监测网(Tyrgeonet Project)。中欧16个国家将联合布设GPS监测网，以利合作研究大地测量与地球动力学。加拿大在其西部，布设了GPS变形阵列。埃及在其境内，也布设了GPS监测网，南美洲的南部，已开展SAGA会战，以研究南美洲地壳形变。澳大利亚、南加利福尼亚、东地中海、苏门答腊、黑海——高加索地区等都布设了地壳运动GPS监测网。菲律宾已开始用GPS监测马戎火山喷发前后的地面形变。自1994年开始，我国参加了由十几国家、二十多个在南极台站参加的"国际南极GPS会战"，研究南极板块运动及南极地形变。

10.8.2 在农业领域中的应用

(1)概述

农业生产中增加产量和提高效益是根本目的。要达到增产高效的目的，除了适时种植高产作物，加强田间管理等技术措施外，弄清土壤性质，监测农作物产量、分布、合理施肥以及播种和喷撒农药等也是农业生产走向大农业和机械化道路，大量采用飞机撒播和喷药，为降低投资成本，如何引导飞机作业做到准确投放，也是十分重要的。

利用GPS技术，配合遥感技术(RS)和地理信息系统(GIS)，能够做到监测农作物产量分布、土壤成分和性质分布，做到合理施肥、播种和喷撒农药，节约费用，降低成本，达到增加产量提高效益的目的。

(2)用于农业运输和农机具

在运输和播种或收割的农机具上安装车载GPS接收机，在电子地图上可跟踪车辆，便于调动和指挥，当某辆车发生故障时，指挥中心马上可知道其位置。如在车辆上再安装上车辆警戒监视系统，遇有反常现象即嗡鸣示警。

(3)在防治病虫害方面的应用

在农田病虫害发生时，植物保护人员利用GPS可对发生地区精确定位，特别是能够定位区域灾情的轻重。而后将这些信息输入计算机，计算机根据灾情信息和地理信息系统(GIS)能够确定在不同灾情区域的投药量。如果使用飞机进行防治时，机载的GPS和计算机能够进行精确投药。

(4)在播种和施肥方面的应用

种子、肥料以及农药的播撒对提高苗木的产量起着重要作用，但是要将它们准确地播种到所需要位置是很困难的。尤其是大面积的飞机播撒更是如此。利用飞机进行播种、施肥、除草等工作，作业费用昂贵。合理地布设航线和准确地引导飞行，将大大地节省飞机作业的费用。根据国外介绍，利用差分GPS对飞机精密导航，估计会使投资降低50%。具体应用中，利用GPS差分定位技术可以使飞机在喷撒化肥和除草剂时减少横向重叠，节省化肥和除草剂用量，避免过多的用量影响农作物生长。还可以减少转弯重叠，避免浪费，节省资源。对于在夜间喷施，更有其优越性。因为夜间蒸发和漂移损失小，另外夜间植物气孔是张开的，更容易吸收除草剂和肥料，提高除草和施肥效率。依靠差分GPS进行精密导航，引导农机具进行夜间喷施和田间作业，可以节省大量的农药和化肥。

采用 GPS 技术提高播撒的精确性，从而为增加产量和效益提供了一条极好的途径。

(5)土壤养分分布调查

在播种之前，可以利用一种适用于农田中运行的采样车辆按一定的要求在农田中采集土壤样品。车辆上配置有 GPS 接收机和计算机，计算机中配置地理信息系统软件。采集检疫站样品时，GPS 接收机把样品采集点的位置精确地测定出来，将其输入计算机，计算机依据地理信息系统将采样点标定，绘出一幅土壤样品点位分布图。

(6)监测作物产量

在联合收割机上配置上计算机、产量监视器。例如监视玉米产量的监视器，当收割玉米时，监视器记录该株玉米所结穗数和产量，同时 GPS 接收机记录下收割该株玉米所处位置，通过计算机最终绘制出一幅关于每块土地产量的产量分布图。通过对土壤养分含量分布图的综合分析，可以找出影响作物产量的相关因素，从而进行具体的田间施肥等管理工作。

总之，GPS 技术在农业领域发挥重要作用。在我国，尚需积极开展在农业中的应用研究以及相关设备的研制。特别在大平原地区，利用大规模的机械化生产的地区，应当重视 GPS 技术在农田作业和管理中的应用。

10.8.3 在林业管理方面的应用

(1)概述

GPS 技术在确定林区面积，估算木材量，计算可采伐木材面积，确定原始森林、道路位置，对森林火灾周边测量，寻找水源和测定地区界线等方面可以发挥其独特的重要的作用。在森林中进行常规测量相当困难，而 GPS 定位技术可以发挥它的优越性，精确地测定森林位置和面积，绘制精确的森林分布图。

(2)在森林资源调查中的应用

安徽省在 1997 年全省野生动物普查中，采用在全省范围内机械布点方法，并以样点为起点从东向西设置宽 72m、长 5km 的调查样带，野外调查队员需要从起点开始顺着样带行走调查。每个野外调查组都配备了一台 GPS 接收机来定位，利用其导航模式确定路线和路程，并可随时随地进行动态定位以修正路线，不仅大大减轻工作量，提高了调查速度和精度，也确保了抽样样带的一致性。

(3)测定森林分布区域

美国林业局是根据林区的面积和区内树木的密度来销售木材。对所售木材面积的测量闭合差必须小于 1%。在一块用经纬仪测量过面积的林区进行偏差校正，得到的结果与已测面积误差为 0.03%。这一实验证明了测量人员只要利用 GPS 技术和相应的软件沿林区周边使用直升机就可以对林区的面积进行测量。过去测定所出售木材的面积要求用测定面积的各拐角和沿周边测量两种方法计算面积，使用 GPS 进行测量时，沿周边每点上都进行了测量，而且测量的精度很高很可靠。传统的方法将被淘汰。

(4)GPS 技术用于森林防火

当森林大火发生时，由于森林大火蔓延很快，而且火势和方向不可预见。而消防人员必须掌握有关火情精确的最新数据。GPS 技术是一种不依赖于界碑或路标的动态位置确定系统，能够采集数据并绘出火势图，为森林灭火提供决策依据。

在森林灭火过程中，采用 GPS 技术能够确定燃烧区域的面积，它和红外热探测系统结合使用，能够精确测定林下火仍在闷烧的小区域。

在火后，制定森林管理计划时，携带 GPS 接收机的工作人员能把整个着火区以及高强度燃烧区域绘制成地图。做为制定森林管理计划的依据。

GPS 在美国森林防火中的实际应用证明，GPS 的导航定位能力在森林防火中可发挥重要作用。目前，国产廉价 GPS 接收机可视为对热源精确定位的有效工具，侦察直升机上的人员可记录下热源位置，并通过无线电波将信息发射到地面以迅速作出反应。

附录A 国内外主要GPS接收机简介

A.1 Leica GPS接收机

A.1.1 概况

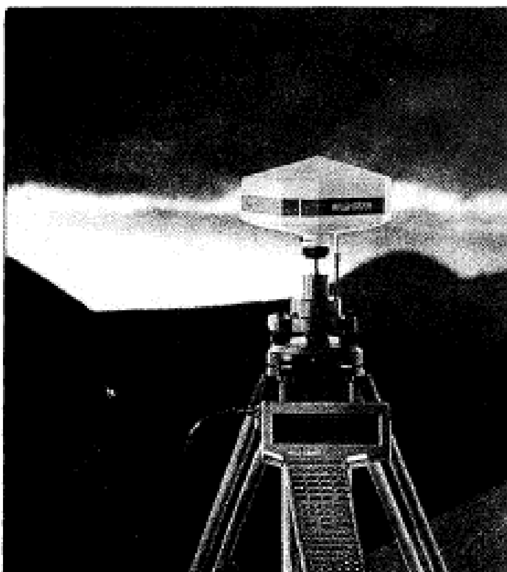
徕卡(Leica)公司的前身为瑞士威特(Wild)测量仪器厂,创建于1921年。凭借其在常规测绘仪器制造和销售方面的经验,利用美国马格纳沃克斯(Magnavox)公司在导航电子设备制造方面的优势,于20世纪80年代中叶合资开办了WM卫星测量公司,联合设计生产大地测量型GPS接收机。1986年生产出世界上第一台结构紧凑、全封闭的WM101单频GPS接收机,1988又推出改进型WM102双频GPS接收机。随后威特公司又相继与德国莱茨(Leitz)、瑞士克恩(Kern)、英国卡姆布里德格(Cambridge)等公司合并成一大国际集团公司,取名为徕卡公司。该公司于1992年下半年推出原WM型接收机的更新产品,即Wild 200 GPS测量系统,成为世界上第一台拥有快速静态定位功能的GPS测量仪器,1995年又相继推出了增强型Wild 300 GPS测量系统,它与Wild 200机型相互兼容。

Wild 200/300 GPS测量系统,比起WM 101/102型接收机,不仅设计新颖,重量轻,体积小,特别是具有功能很强的后处理软件。该软件采用了解算整周待定值的快速逼近技术,开发了高精度快速静态相对定位和动态相对定位等多种测量模式,这对于提高作业效率,开拓GPS定位技术的新应用领域具有深远意义。

近几年,徕卡公司采用了卫星信号跟踪新技术(Clear TrakTM),又推出了新一代的徕卡GPS 500系列,作为跨世纪产品。该技术在有效对付AS政策,克服多路径影响,消除无线电干扰,保证与未来卫星信号兼容等方面取得了突破性的进展。

A.1.2 硬件部分

Wild 200/300型GPS测量系统的硬件,由双频GPS传感器(SR299/SR399)和手持式控制器(CR244/CR344)以及电源组成,Wild 200/300外型如图A.1所示。



图A.1 Wild 200/300型GPS测量系统

该系统在接收原理方面继承了WM 102抗干扰能力强和兼容P码的长处,和采用平方技术进行L2载波相位测量的特点。设有L_1和L_2各9个通道,可连续同步跟踪9颗



图 A.2 Wild 500 型 GPS 测量系统

卫星。数据采样间隔可在 1～60s 间任意设置，卫星截止高度角也可任意设定。该系统硬件的特点是，将天线、前置放大器和主机部分融为一体，称为传感器，而将控制部分和记录部分合并为控制器，更方便于野外测量工作。SR299/SR399 传感器，主要用于接收来自 GPS 卫星的信号，并进行码相关测量和 L_1、L_2 双频载波相位测量。CR244/CR344 控制器，用于控制 SR299/SR399 传感器的各种作业模式，监视其作业进程和记录观测数据。

徕卡 GPS 500 系列接收机（见图 A.2）采用 TR500 操作器和 AT501 天线。操作器主要用于获取野外数据时输入点号、天线高，甚至可以是输入代码和属性，显示卫星跟踪、接收机、记录、电源状态以及其它信息。接收机电源采用两个便携式电池，可直接插到接收机中，在作业过程中可自由更换。由于仪器功耗只有 5W，因此两个内插电池可以连续供电 7.5 小时，对于参考站的连续测量，还可以用外接电池供电。在数据记录方面，可以选用 PCMCIA 内存卡，也可选用 4MB 和 10MB 的内部存储器。它们的共同特点是数据存储量大且数据传输快。

A.1.3 软件部分——SKI 软件包

SKI 是 Wild 200/300 GPS 测量系统静态与动态定位的通用后处理软件包。它可处理该测量系统获取的各类测量数据，其主要功能模块包括：系统配置、测量作业计划编制、项目管理、输入输出管理、多基线平差处理、数据调阅及编辑等。该软件包还有以下两项选件：

①坐标系统转换和地图投影计算软件。该软件可将 GPS 测量结果，换算到用户所需要的区域性坐标系统以及将大地坐标投影到用户需要的平面坐标系统。

②数据标准化交换格式（Rinex 格式）输入接口软件。应用该软件可使 SKI 软件处理不同类型 GPS 接收机的观测数据。

如果以便携式微机代替 CR244/CR344 控制器作业的话，则应借助 PC 机控制软件（SPCS 软件）来实现 CR244/CR344 控制器的功能。

由上述硬件和软件支持的 Wild 200/300 GPS 测量系统，其主要特点有：

①整个系统的自动化和智能化程序较高。传感器具有快速响应能力，开机后 30 秒即可输出正常的观测值。

②数据存储和电源配置具备灵活性。更换电池不影响仪器工作。

③软件技术先进。由于 SKI 软件采取了快速逼近技术解算整周待定值，因而观测时间可大为缩短。一般在 20km 以内的基线上，只需 1～2 分钟的双频观测数据，就可以准确地确定整周待定值，每一处理周期（包括估算、搜索、分析和决策）只需几秒钟。

④系统的配置灵活。

⑤系统支持的作业模式有多种，其中包括静态定位、快速静态定位、往返式重复设站、准动态定位和动态定位等。

徕卡 GPS 500 系列接收机采用新的 SKI－Pro 软件，它可以在 Windows98 和 NT 平台上运行的高度自动化的软件，同样可用最少的操作干预来精确、快速地进行处理，对于高级用户有丰富的范围进行细节的分析，可进行完整的报表和质量控制。

静态相对定位的精度可达 5(mm) + 1ppm × D，动态相对定位的精度可达 1～2cm；而三维单点实时定位的精度为 15m。在基线不超过 15km 的情况下，静态相对定位，一般只要观测 1～2 分钟，而准动态相对定位，每点只要观测数秒钟便可达到上述精度。因此该测量系统的作业速度快、精度高，能适应不同精度要求，不同边长和不同类型的测量任务，用途甚为广泛。

A.2 Trimble GPS 接收机

A.2.1 概况

美国天宝(Trimble)导航公司，是 1978 年成立的专门从事生产和销售 GPS 接收机的私营股份公司。迄今为止，该公司已生产有大地型、导航型和授时型三大类 GPS 接收机，计有 20 多种型号。大地型接收机从 1985 年开始陆续投放市场，并称为 4000 系列，其型号经历了从 A/AX、S/SX、SL/SD、ST/SST 到目前的 SE/SSE 的发展过程。当前国内 GPS 用户所拥有的接收机，主要是 ST/SST 型，这类机型又分为陆地测量型、海洋测量型和航摄测量型。其标称精度，ST 型单频机为 10mm + 2ppm × D，SST 型双频机为 5mm + 1ppm × D。该公司 1991 年下半年推出的 SE/SSE 型接收机，为该接收机系列的更新产品，按其用途分为静态大地测量型和动态大地测量型两种。其中双频 P 码大地型接收机，可用于大于 50km 的基线测量，精度可达毫米级。

A.2.2 硬件部分

天宝(Trimble)公司 4000 系列的 E 型与 T 型接收机，其外形大体相同，只是 E 型机的体积较小，重量较轻，信号通道增加到 9 个，另外控制部分的按键分布也稍有变动。SE 型为单频机，SSE 型为双频机，其外型如图 A.3 所示。



图 A.3 Trimble 4000 SE/SSE 型 GPS 接收机

静态大地测量系统，是一种整体接收设备。即微带天线直接安装在主机顶板上，主机底板又可与三脚架基座相接，轻型电池可挂在三脚架上。这样在野外作业时，只需将仪器安置在

测站点，可无人值守地连续观测约7h。因整机具备良好的防水性能，故无需考虑作业的天气状况。

动态大地测量系统，是一种流动作业的碎部点数据采集设备，由单人操作。测量时，作业员可背负装有接收机和电池的背包，一手持安装有天线的轻便动态测量杆，一手持TRK48遥控键盘。到一碎部点后，先安置测量杆再输人点号等有关数据，经数秒种的观测即可移至另一站。因此，整个作业过程只需一人携静态、动态两套接收机，到测区采集有关数据。在室内，用Trimvec Plus和Trimmap软件进行约1小时的处理，就能得到一张大比例尺地形图。

目前Trimble 5700系列的最新产品是Trimble 5700（见图A.4），它是把GPS接收机、GPS天线、RTK电台及电台天线缩小在单一的轻型机壳中的最新型的双频GPS接收机。



图A.4 Trimble 5700双频GPS接收机

A.2.3 软件部分

软件包业经多个版本的更新，ST型机用60版，而SE型机已用90版。其特点是采用项目控制方式，具有图形显示功能，能生成Rinex数据格式，可在IBM—PC机及其兼容机上运行。下面介绍它的主要组成部分和功能。

①Plan程序　根据星历预报某测站某一天内的卫星分布情况，供用户安排观测计划。

②4000程序　对接收机中的数据文件进行管理并传输到计算机内，而后调用Trim 640或Trimmbp软件进行处理。

③Trim 640和trimmbp软件　用于基线处理。Trim 640只处理单基线；Trimmbp可处理10台接收机的同步观测数据，采用伪距和伪距差分定位改善测站坐标初值，自动处理周跳和劣观测值，能处理静态、准动态及动态等测量模式的观测数据。

④Kin程序　自动处理准动态测量的观测数据，只要每个流动站上有4颗及4颗以上的有效卫星，并有2~8个历元的观测数据，就可达到厘米级定位精度。

⑤Tclose程序　根据指定路线算出坐标增量闭合差，以校验GPS测量的精度。

⑥Trimnet程序　进行GPS网平差，坐标转换及投影变换，GPS网与地面网联合平差等。

⑦Trimsdb程序　具有编辑、更新、检索、统计和图形显示功能，专用于测量控制点资料管理。

当利用TRK48控制SE型接收机进行准动态观测之后，除借助90版的Trimvec Plus软件进行数据处理外，还可通过Trimmap地形绘图软件，自动绘成详细的地形图。

Trimmap绘图软件的运行环境为：IBM—PC及兼容机，CGA、EGA或VGA图解机，HP绘图机等。绘图的功能包括：提供地图符号码、图例、线形符号、平面符号等；结合“解析测图装置”（CAD），提供人机对话的编辑以说明注记、晕线及其它地图要素；利用野外定位数据，快速而准确地绘出等高线图和断面图。该软件可用于地形测量，公路、铁路的勘测、选线和建筑测量，土地开发测量、矿山测量及变形测量等。Trimmap绘图软件包的开发成功，有效地增强了GPS测量后处理的功能，为测绘工作提供了一个自动化的新工具。

A.3 Ashtech GPS 接收机

A.3.1 概况

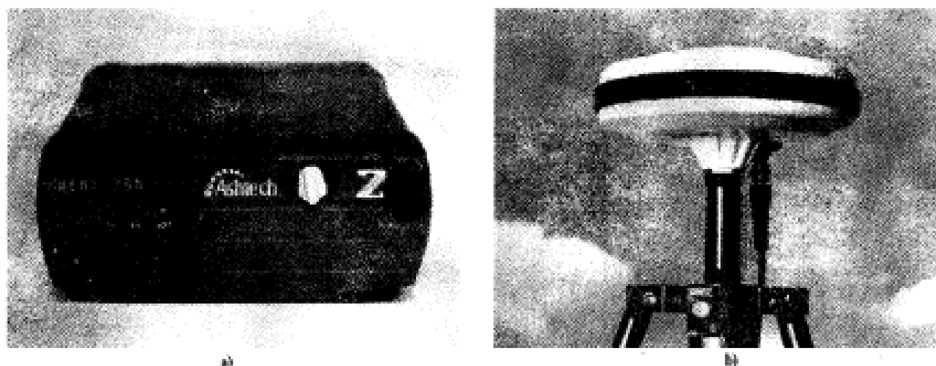
美国专家阿士杰(Ashjaee)博士，根据他长期从事 GPS 接收机研制和设计方面的经验，于1987 年创办了阿士泰克(Ashtech)公司，并推出 Ashtech－ⅩⅡ型 GPS 接收机。曾在 1988 年国际宇航学会的会议期间展示过，由于其设计新颖、技术先进、功能齐全和操作方便，而荣获 GPS 最佳产品奖。

Ashtech－XII 为系列产品，最初的样机为 S 型，需配一个便携式微机进行显示和记录数据；正式投放市场的 *L* 型接收机，包含了数据采集、固态存储器和各种显示功能；而后又改进为体积更小的 M 型；当天线与主机安装在一起时，就成为 LT 型或 MT 型；如果加上 L_2 频率插板，即为双频的 LD 型或 MD 型；后来又推出了能获得 P 码的 P－12 型。

阿什泰克不断地推出新的技术和新的产品，1993 年，在 Ashtech P－12 型接收机的基础上，采用获得专利的 Z－跟踪技术，推出了新型的 Ashtech Z－12 GPS 接收机。随后又推出了可以同时接收美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 两种卫星定位系统信号的 24 通道型 GG24 兼容接收机，以及双系统的 GGRTK 兼容机、双系统(GPS＋GLONASS)双频基准站型接收机 Z－18。由于两种卫星系统星座的卫星总数为 48 颗，使得在只使用 GPS 卫星信号的 GPS 接收机无法工作的一些卫星信号被遮挡的地区，如城市市区和河谷区，也能进行卫星定位测量和 RTK 作业。

目前最新型的是 Z－x 快速 RTK GPS 测量系统，它将 Z－x GPS 接收机与功能强大的手持计算机和高性能无线电数据链相接合，实时提供厘米级测量精度。该款接收机的外型如图 A.5所示。

鉴于 Ashtech Z－12 GPS 接收机，在我国已有不少用户，现将其特点简单介绍于下。



a)　　b)

图 A.5　Ashtech Z－x GPS 接收机

A.3.2 硬件部分

Ashtech Z－12 GPS 接收机，该机具有 12 个独立的通道，可以同时跟踪 GPS 的全部可见卫星，其操作极为简单，只要一开机就能自动跟踪卫星、自动采集和记录测量数据。采集的数据包括具有时间标记的相位测量值、C/A 码伪距值、积分多普勒值以及导航电文。

Z－12型接收机采用了先进的Z－跟踪技术，当GPS卫星实施AS的条件下，能自动的启动Z跟踪方式，以锁定载波 L_1 和 L_2 上的P码观测数据，具有极强的快速定位能力；而当AS解除后，接收机又可自动恢复P码跟踪方式。它不仅能测量 L_1 和 L_2 的P码相位，而且能测量载波 L_1 和 L_2 的全波长相位。这种跟踪方式所得观测量的信噪比，比使用其他技术的GPS接收机高出13分贝，因此其抗干扰能力大为加强，而且可使观测时间大为减少。该机的测量模式主要有：静态测量、快速静态测量、准动态测量、动态相对定位以及实时单点定位。

Ashtech Z－12的主机，采用轻质合金框架，铝外壳的全密封设计，以适应野外作业环境。控制单元是附在主机前面的可分离式面板，该面板具有显示8行×40字符的液晶显示屏。在显示屏幕周围，只装有10个数字键、2个输入删除键和4个带有附加功能的指标移动键。操作时可采用极简单的项目单来控制仪器。主机的后面板装有若干接口，其中包括：天线插孔；两个外接电源插孔；两个串行的RS232接口；1pps时间输出接口和连接摄影机的插孔；连接外部精密振荡器的接口。

该机的记录部分，是具有2mb的固态内存记录介质。若相位测量值的采样率取20s，则可记录6颗卫星的24h数据。

天线采用微带型天线，并装有低噪声前置放器，重量约为11kg，天线基板直径为29cm。在精密静态测量时，可采用铝制扇形板，使天底板扩展至直径为71cm，这样可列好地抑制多路径影响。天线平台可安置在各种三脚架上，或安置在可伸长的动态测量杆上。

阿什泰克的测量型接收机的基线测量精度为5mm＋1ppm×D；实时差分定位(RTD)精度优于1m；RTK定位精度为1～2cm。当用于一些高精度要求的应用项目时，使用特殊的观测方法和专用软件进行处理，Z－12系列的GPS接收机的相对定位精度可以达到0.1ppm×D甚至更高的水平。

A.3.3 软件部分

Ashtech Z－12 GPS接收机观测数据的后处理，采用GPPS软件包，它可在IBM—PC及兼容机上运行。GPPS软件包的设计，采用了三差分和双差分技术，包括浮点、定点解算步骤。GPPS软件包可分三大部分：

①观测计划软件。该软件可产生天空卫星分布图，以显示卫星高度和方位角及测站周围障碍物信息，并给出表征卫星几何配置的精度因子PDOP和RDOP，以便选择最好的卫星配置和最佳的观测时段。

②基线向量处理软件。该软件的特点是，只处理单基线，可自动消除周跳，能得到基线向量的三差解及双差的浮动解或固定解，并可显示残差。处理中既可用广播星历，也可用标准格式的精密后处理星历。

软件运行中的选择项为：整周待定值用双差固定解或是双差浮动解(依基线长度定)，观测历元间隔(采样率)，截止高度角，残差编辑标准，对流层延迟改正等。

用该软件处理后的输出值为：测站的起始坐标(纬度、经度和高程)，处理时采用的历元总数，舍去的历元数，检测出的周跳数，整周待定值的固定解或浮动解，基线坐标分量(ΔX，ΔY，ΔZ)，基线长度和方位角及大地高差。

③应用软件。包括质量控制的环闭合差计算、三维平差和坐标变换程序，以及归档测量结果和数据库文件管理、将原始观测值变为标准国际交换格式，将向量结果和项目信息纳人FGCC标准格式等程序。

值得一提的是新型的静态测量综合软件 PRISM 和 WinPRISM，不但能处理 GPS 接收机的测量数据，也可以处理 GPS + GLONASS 兼容型接收机的测量数据。

A.4 发展趋势

以上，我们简单地介绍了几种当前具有代表性的高精度 GPS 测量系统，但是，随着 GPS 定位技术的不断完善和普及，新一代测量系统的研究、设计与生产也在迅速地发展，新的产品将不断问世。目前的发展趋势是：

(1)在硬件方面

①继续向小型化、轻型化发展；

②结构模块化，减少易损的接口；

③控制器小型化，以更方便用户操作，提高自动化程度；

④降低功率消耗；

⑤改善存储器管理，增大存储容量；

⑥信号接收、跟踪、处理与量测单元一体化，以减少信号损失；

⑦改善接收机内部电路设计，减弱多路径误差的影响；

⑧改善信号处理技术(如采用窄相关技术)，以提高信号的量测精度；

⑨降低价格。

(2)在软件方面

①进一步增强数据的综合处理功能，改善定位结果的精度，以满足不同用户的要求；

②加强网平差、坐标系统转换以及成果的分析能力；

③GPS 网与地面网联合平差方法的优化，提高数据处理的速度和改善平差结果的精度；

④增强绘图功能，开发控制测量、地形地籍测量和绘图一体化的软件系统；

⑤提高自动发现和修复周跳的能力；

⑥发展快速解算整周待定值技术，以缩短观测时间，提高作业效率；

⑦开发与完善动态确定整周未知数的技术，进一步发展精密实时相对定位技术；

⑧发展数据处理的轨道改进技术，提高长距离的测量精度；

⑨差分 GPS 修正量算法的最优化和数据传输格式的标准化；

⑩提高数据处理的自动化水平。

附录B　SKI软件基线解算文件示例

@%Unit:　m

@%Coordinate type:　Cartesian

@%Reference ellipsoid:　WGS 1984

@#jjjj0001　-2591254.9019　4750522.0595　3364890.6454　12

@&　0.00140483　0.42478266　-0.51578450　-0.35292730　1.08902168　0.64701813

0.65444571

@+jjjj0003　-2590713.3877　4748116.9219　3368726.3111

@-jjjj0001　-541.5133　2405.1380　-3835.6660

@=　0.39861691　0.00000373　-0.00000404　-0.00000287　0.00000652　0.00000412

0.00000444

@#jjjj0002　-2591413.3132　4750159.4069　3365278.6402　12

@&　0.43675920　0.00000159　-0.00000214　-0.00000088　0.00000610　0.00000217

0.00000171

@+jjjj0001　-2591254.9019　4750522.0595　3364890.6454

@-jjjj0002　-158.4113　-362.6526　387.9948

@=　0.43675920　0.00000159　-0.00000214　-0.00000088　0.00000610　0.00000217

0.00000171

@#jjjj0003　-2590713.3877　4748116.9219　3368726.3111　12

@&　0.00376899　0.46933645-0.47926864　-0.35265961　1.08621049　0.64633512

0.63508248

@+jjjj0004　-2590634.4216　4747678.3706　3369426.3846

@-jjjj0003　-78.9623　438.5538　-700.0736

@=　0.31941870　0.00000221　-0.00000144　-0.00000111　0.00000477　0.00000253

0.00000261

@#jjjj0004　-2590634.4216　4747678.3706　3369426.3846　12

@& 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.00000000

@ # jjjj0005 -2592930.1636 4747734.6948 3367533.4203 12

@& 0.40749738 0.00000342 -0.00000281 -0.00000245 0.00000564 0.00000394
0.00000416

@ + jjjj0006 -2593318.7739 4746919.3428 3368415.9030

@ - jjjj0005 388.6103 815.3520 -882.4827

@ = 0.40749738 0.00000342 -0.00000281 -0.00000245 0.00000564 0.00000394
0.00000416

@ # jjjj0006 -2593318.7739 4746919.3428 3368415.9030 12

@& 0.00212051 0.58933586-0.37775001 -0.31657881 1.07441437 0.57947916
0.64149451

@ + jjjj0004 -2590634.4216 4747678.3706 3369426.3846

@ - jjjj0006 -2684.3503 -759.0263 -1010.4815

@ = 0.40445384 0.00000223 -0.00000145 -0.00000112 0.00000482 0.00000254
0.00000262

@ # jjjj0100 -2591373.9791 4749899.8361 3365714.3205 12

@& 0.00743601 0.44615483-0.49936271 -0.35895231 1.08903527 0.65794730
0.63398588

@ + jjjj0002 -2591413.3132 4750159.4069 3365278.6402

@ - jjjj0100 39.3313 -259.5671 435.6826

@ = 0.67474908 0.00000352 -0.00000572 -0.00000286 0.00001783 0.00000858
0.00000598

@ # jjjj0101 -2592334.2566 4748203.5617 3367372.9885 12

@& 0.01217980 0.43190777 -0.51028365 -0.35400638 1.08796489 0.64840955
0.65062350

@ + jjjj0003 -2590713.3877 4748116.9219 3368726.3111

@ - jjjj0101 -1620.8746 86.6441 -1353.3404

@ = 0.71032715 0.00000298 -0.00000317 -0.00000306 0.00000518 0.00000486

0.00000691

@ + jjjj0100 - 2591373.9791 4749899.8361 3365714.3205

@ - jjjj0101 - 960.2936 - 1696.2359 1658.6667

@ = 0.93927246 0.00000396 - 0.00000556 - 0.00000433 0.00001026 0.00000757

0.00000820

@ + jjjj0005 - 2592930.1636 4747734.6948 3367533.4203

@ - jjjj0101 595.9123 468.8582 - 160.4252

@ = 0.86162502 0.00000339 - 0.00000278 - 0.00000242 0.00000560 0.00000390

0.00000412

附录C　POWERADJ软件二维约束平差示例

软件名称:PowerAdj 3.0 中文 Windows95 版
研制单位:武汉天任勘测科技有限责任公司
工程名称:江浦城市测量
测量单位:南京北极测绘院
负责人:　GPS
坐标系统:独立坐标系
中央经度:东经 118 度 50 0.00000
网的等级:四级
时间:　23 时 46 分 6 秒
日期:　1999 年 10 月 5 日
已知数据信息

固定点数:2
点号:100x = 148083.7500　y = 114136.1260
点号:101x = 150032.4160　y = 115795.3910
固定方位角数:0
固定距离数:0

二维平差最后的结果

点号	x(m)	y(m)	距离(m)	方位角(度分秒)	目标点号
-*-	-*-	-*-	-*-	-*-	-*-
100	148083.7500	114136.1260			
			2559.3866	40.245034	101
101	150032.4160	115795.3910			
2	147583.7378	114045.3409			
			508.1871	10.172706	100
4	152451.9710	114559.5524			
			829.7400	189.524307	3
			2966.9326	113.392593	6

6	151261.4486	117277.1516			
			1262.6063	215.313648	5
5	150233.8843	116543,4717			
			774.7349	254.553752	101
3	151634.5332	114417.2008			
			4559.5359	188.384960	1
			2113.3357	139.174876	101
1	147126.8252	113731.6824			
			554.2118	34.280686	2

GPS 基线向量的残差：

起点——终点	x 的残差(cm)	y 的残差(cm)
3--1	Vx=0.26	Vy=.13
1--2	Vx=0.06	Vy=-.05
4--3	Vx=0.13	Vy=-.12
3--101	Vx=0.70	Vy=.09
5--101	Vx=-1.58	Vy=-.02
4--6	Vx=-.14	Vy=.19
6--5	Vx=-.36	Vy=.00
2--100	Vx=.38	Vy=.00
100--101	Vx=.52	Vy=.79

[pvv]1: 4.46 [pvv]2: 4.46 单位权中误差(cm):.86

测站点位精度和误差椭圆元素：

点号	x 坐标中误差 (cm)	y 坐标中误差 (cm)	点位中误差 (cm)	误差椭圆长半轴 (cm)	误差椭圆短半轴 (cm)	误差椭圆长轴方向 (度分秒)
2	.94	1.16	1.49	1.43	.43	52.0538
4	.96	.93	1.33	1.27	.42	43.4927
6	1.02	1.01	1.43	1.35	.46	44.3720

5	1.07	1.04	1.49	1.42	.47	44.0758
3	.90	.85	1.24	1.19	.37	42.4626
1	.93	1.00	1.37	1.30	.41	47.3427

在 GPS 测站间方向和距离的精度：

起点	终点	方向权倒数	方向中误差（弧秒）	距离权倒数	距离中误差（cm）	距离相对中误差
3	1	0.10	.28	.83	.79	1/579334
1	2	3.57	1.63	.80	.77	1/71809
4	3	1.61	1.09	.34	.50	1/166032
3	101	1.78	1.15	.20	.39	1/546035
5	101	6.56	2.21	2.07	1.24	1/62422
4	6	.31	.48	.25	.43	1/686010
6	5	.37	.52	1.13	.91	1/138064
2	100	22.46	4.09	1.64	1.10	1/46007
100	101	.00	.00	.00	.00	1/9999999

主要参考文献

1 徐绍铨,张华海,杨志强,王泽民.GPS测量原理及应用.武汉:武汉测绘科技大学出版社,1998.

2 高成发.GPS测量.北京:人民交通出版社,1999.

3 刘大杰,施一民,过静珺.全球定位系统(GPS)的原理与数据处理.上海:同济大学出版社,1996.

4 周忠漠,易杰军.GPS卫星测量原理与应用.北京:测绘出版社,1997.

5 王广运,郭秉义,李洪涛.差分GPS定位技术与应用.北京:电子工业出版社,1996.

6 刘经南,陈俊勇,张燕平,李毓麟,葛茂荣.广域差分GPS原理与方法.北京:测绘出版社,1999.

7 黄卫,陈里得.智能运输系统(ITS)概论.北京:人民交通出版社,1999.

8 葛茂荣.GPS卫星精密定轨理论及软件研究.(博士学位论文).武汉:武汉测绘科技大学,1995.

9 胡伍生.GPS精密高程测量理论与方法及其应用研究.(博士学位论文).南京:河海大学,2001.

10 陈俊勇.中国国家高精度GPS大地控制网的建成.测绘通报,1998(8):2~3.

11 党亚民,李毓麟.川滇GPS地壳形变监测网的观测与数据处理.地壳形变与地震,1996,16(4):31~36.

12 李延兴.华北地区GPS形变监测网的建立与精度分析.测绘学报,1994,23,(2):142~149.

13 王解先,朱文耀.IGS'92 GPS全球联测的分析处理.测绘学报,1994,23(3).

14 刘经南,葛茂荣.92中国GPS会战(A级网)数据处理分析.武汉测绘科技大学学报,1995(1):40~45.

15 葛茂荣,刘经南.GPS定位中对流层折射估计研究.测绘学报,1996,25(4):285~291.

16 欧吉坤.GPS测量的中性大气折射改正的研究.测绘学报,1998,27(1):31~36.

17 邵占英,刘经南等.GPS精密相对定位中用分段线性法估算对流层折射偏差的影响.地壳形变与地震,1998,18(3):13~18.

18 邵占英,葛茂荣,刘经南.GPS定位中对流层折射率随机模型的研究.地壳形变与地震,1996,16(2):1~7.

19 袁曾任.人工神经元网络及其应用.北京:清华大学出版社,1999.

20 焦李成.神经网络系统理论.西安:西安电子科技大学出版社,1990.1~51.

21 胡伍生,华锡生,吴中如.用神经网络方法探测数学模型误差.大坝观测与土工测试,2001,25(4):13~16.

22 胡伍生,华锡生,鲍兴南.转换GPS高程的神经元网络方法.河海大学学报,2001,29(6):87~89.

23 岳东杰,黄腾.GPS高程的抗差拟合推估.河海大学学报,1999,27(6):90~93.

24 华锡生,雷伟刚,岳东杰.GPS高程异常模型的优选及分析.大坝观测与土工测试,2000,24(4):16~18.

25 杨明清,靳蕃,朱达成等.用神经网络方法转换GPS高程.测绘学报,1999,28(4):301~307.

26 Wusheng HU, Yuedong Kong, Yongfeng DENG, Shanlong KUANG,《A New Method to Derive Normal Height from GPS Height Based on Neural Network》, XXII FIG International Congress, April 19 ~ 26, 2002, Washington, USA.

27 黄人堂，卫启云，涂树基等. GPS 在应县木塔变形监测网中的应用研究. 北京测绘，2000 (2):28 ~ 33.

28 徐绍铨. 隔河岩大坝 GPS 自动化监测系统. 铁路航测，2001(4):42 ~ 44.

29 施一民. GPS 技术用于高等级公路勘测的若干问题. 同济大学学报，1996，24(1):105 ~ 110.

30 高成发. 公路勘测 GPS 首级控制网的内业平差优化处理. 东南大学学报，2001，31(3):90 ~ 93.

31 姚连璧，朱照宏. RTK 技术在道路定测中应用的研究. 中国公路学报，2000，13(1):14 ~ 17.

32 李冰皓，白涛，谢宝童等. GPS RTK 在水下地形测量中导航定位的应用. 北京测绘，2000 (3):9 ~ 11.

面向21世纪交通版高等学校教材、教学参考书（公路类）目录

交通工程专业

序号	教 材 名 称	定价	主编学校
1	国家规划教材--交通工程学	42元	北京工业大学
2	国家规划教材--交通工程总论（第二版）	32元	东南大学
3	交通运输工程导论	22元	同济大学
4	国家土木工程专业规划教材--道路工程（土木、交通工程）		同济大学
5	交通工程专业英语	28元	哈尔滨工业大学
6	交通调查与分析（第二版）	33元（估）	长安大学
7	道路通行能力分析	27元	长安大学
8	城市交通网络分析		华中科技大学
9	道路与交通工程系统分析	33元（估）	东南大学
10	交通影响分析		华中科技大学
11	交通系统仿真技术	26元	北京工业大学
12	交通流理论	21元	吉林大学
13	城市总体规划原理		同济大学
14	交通枢纽规划与设计		哈尔滨工业大学
15	交通规划与设计		东南大学
16	公路网规划	27元	哈尔滨工业大学
17	停车场规划设计与管理	30元	北京工业大学
18	交通设计方法与运用		同济大学
19	交通工程设施设计	35元	东南大学
20	交通工程设计理论与方法	40元	长安大学
21	机电工程系统		华南理工大学
22	国家规划教材--交通管理与控制（第二版）	25元	同济大学
23	交通与环境		长安大学
24	智能运输系统概论	25元	吉林大学
25	道路交通安全	34元（估）	哈尔滨工业大学
26	道路交通安全管理法规概论及案例分析	23元（估）	哈尔滨工业大学
27	运输经济学	40元	同济大学
28	客运交通系统		同济大学

29	物流学		同济大学
30	城市轨道交通		同济大学
31	交通工程计算示例		湖南大学
32	交通工程专业课程设计指导书		同济大学
33	交通工程专业生产实习指导书	7元	哈尔滨工业大学
34	交通工程专业毕业设计指导书		长安大学
35	综合运输系统规划（研）		哈尔滨工业大学
36	交通安全系统分析（研）		哈尔滨工业大学

标有估价者为即将出版。

土木工程专业（道路工程专业方向）

序号	教材名称	定价	主编学校
一	基本知识技能层次教材		
1	土质学与土力学（第三版）	26元	同济大学
2	道路建筑材料（第四版）	35元	同济大学
3	公路工程地质（第三版）	23元	长安大学
4	测量学（第二版）	34元	长安大学
5	土木工程概论		同济大学
6	画法几何与工程结构制图（第四版）		同济大学　湖南大学
7	专业英语（第二版）（土木、路桥工程专业）	30元	湖南大学
8	工程经济学原理与应用		长沙理工大学
9	道路勘测设计（第二版）	40元	长安大学
10	公路施工组织及概预算（第二版）		长沙理工大学
11	公路工程项目管理		长安大学
12	路基路面工程（第二版）		东南大学
13	公路经济学教程	23元	长沙理工大学
14	道路结构力学　（上册、下册）	50元	长安大学
15	国家土木工程专业规划教材一路面工程		东南大学
16	道路经济与管理（第二版）		长安大学
17	道路施工技术与管理		重庆交院
18	道路工程（桥隧方向）		重庆交院
二	知识技能拓展及提高层次教材		
1	城市道路设计（第二版）	22元	华中科大
2	道路经济与管理决策		华中科大
3	软土与软土地基处理		同济大学
4	路基路面工程检测技术	46元	长沙理工大学
5	交通地理信息系统		华南理工
6	公路工程计算机辅助管理		长安大学
7	沥青路面		长安大学
8	水泥混凝土路面		同济大学
9	公路养护与管理		长安大学
10	道路与桥梁工程计算机绘图		长安大学
11	公路土工合成材料原理与应用	22元	东南大学
12	路线CAD原理与方法　（研究生教材）		东南大学
13	道路管理与系统分析方法	42元（估）	东南大学
14	地基处理		东南大学
15	路基设计原理与计算	40元	东南大学

16	GPS测量原理及其应用	28元	东南大学
17	公路几何设计与交通安全		长安大学
18	公路防排水与水毁防治技术		长安大学
19	高速公路（第二版）	21元	同济大学
20	公路工程造价编制与管理	31元	重庆交院
21	工程项目招标与投标	35元（估）	重庆交院
22	路面断裂与损伤（研究生教材）		长安大学
23	高等土质学（研究生教材）		长安大学
24	公路环境与景观设计	30元	长沙理工大学
25	道路工程结构分析数值方法（研究生教材）	05.2出版	长沙理工大学
26	道路设施管理		同济大学
27	道路规划与几何设计		同济大学
28	路面设计原理（研究生教材）		同济大学　长沙理工大学
29	路基设计原理（研究生教材）		长安大学　长沙理工大学
30	路线设计原理（研究生教材）		华南理工　长安大学
31	现代道路工程材料（研究生教材）		华南理工　重庆交院
32	工程经济学（研究生教材）		同济大学
33	特殊地区路基工程		长安大学
34	现代加筋土理论与技术		长安大学
35	高速公路设计		长安大学
36	现代土木工程施工		重庆交院
37	土木工程造价控制		长安大学
38	公路工程监理		山东交通学院
39	道路测设新技术		长安大学
40	道路勘测设计一体化		北京工业大学
41	集成化道路、桥梁工程CAD		大连理工大学
42	路基防护与加固工程		重庆交院
43	公路小桥涵勘测设计	35元（估）	重庆交院
44	道路与桥梁工程病害诊断与处治		北京工业大学
45	道路与桥梁检测技术		福州大学
46	水泥与水泥混凝土	30元	长安大学
47	沥青与沥青混合料（研）		长安大学
48	路面功能设计（研）		东南大学
49	道路景观设计（研）		东南大学
50	路面新技术（研）		东南大学

土木工程专业（桥梁与隧道工程专业方向）

序号	教材名称	定价	主编学校
一	基本技能层次教材		
1	桥梁工程（桥方向）（上、下）	上册42元 下册30.8元	同济大学 重庆交院
2	桥梁工程（路方向）		同济大学
3	桥梁工程（土木、交通工程）	58元	湖南大学
4	基础工程（第二版）	33元	长安大学
5	结构设计原理（第二版）		东南大学
6	隧道工程（第二版）		长安大学
7	桥涵水文(第三版)	24元	长安大学
8	钢桥		同济大学
9	斜弯桥设计与分析		同济大学

10	水力学		长安大学
11	轨道交通桥梁		同济大学、重庆交院
12	工程弹塑性力学（研）		浙江大学
二	知识技能拓展与提高层次		
1	高等桥梁结构理论（研）	35 元	同济大学
2	桩基设计与计算		湖南大学
3	桥梁检测与加固	27 元	华中科大
4	桥梁钢－混凝土组合结构设计原理	26 元	哈工大
5	桥梁结构电算（本、研）		同济大学
6	高等钢筋混凝土结构　（研究生教材）	27 元	重庆交院
7	桥梁结构试验	22 元	同济大学
8	桥梁抗震	15 元	同济大学
9	桥梁抗风		同济大学
10	桥梁工程 CAD 及信息技术		湖南大学
11	结构工程数值方法　（研究生教材）		长安大学
12	桥梁施工技术		同济大学
13	桥梁施工组织管理		长安大学
14	桥梁施工控制与监测　（研）		湖南大学、长沙理工大学、重庆交院
15	高等混凝土结构理论（研）		湖南大学、重庆交院
16	现代预应技术－理论与实践（研）		福州大学、重庆交院
17	轨道交通桥梁结构理论　（研究生教材）		同济大学
18	大跨与新型桥梁		福州大学
19	高等隧道与地下工程结构理论（研）		同济大学、长安大学、重庆交院
20	斜拉桥的设计、施工与控制		长沙理工大学
21	大跨度桥梁结构计算理论	18 元	长沙理工大学
22	服役桥梁动态可靠度理论与维修加固策略		长沙理工大学
23	公路隧道勘察设计		长安大学
24	隧道结构计算与分析		长安大学
25	桥梁健康状态监测　（研究生教材）		同济大学
26	大跨度桥梁极限承载力分析		长沙理工大学
27	现代大跨拱桥		重庆交院
28	箱梁理论（第二版）（研）		福州大学
29	结构分析的有限元方法与程序设计（研）		浙江大学
30	桥梁结构动力计算（研）		福州大学
31	桥梁结构稳定理论与计算（研）		福州大学
32	隧道施工（第二版）		长安大学
33	工程结构试验		同济大学
34	隧道运营管理		长安大学
35	桥梁工程概论（土木、交通工程）		长安大学
36	桥梁加固理论与方法		长安大学
37	高等工程结构试验（研）		同济大学
38	桥梁结构分析建模方法与应用		长安大学

公路工程管理专业

序号	教 材 名 称	定价	主编学校
1	建设项目投资控制与管理		长沙理工大学
2	管理信息系统	31 元	重庆交院
3	工程项目融资	29 元	长沙理工大学、华南理工
4	公路建设项目可行性研究		东南大学

5	工程风险管理	21元	湖南大学
6	公路工程定额原理与概预算	34元	长安大学
7	公路工程质量管理与控制		长安大学

四、教学指导书与示例丛书

序号	教材名称	定价	主编学校
一、	路、桥隧专业方向课程设计、毕业设计指导书		
1	《道路勘测设计》毕业设计指导书	30元	长安大学
2	《基础工程》毕业设计指导书		长安大学
3	土木工程专业毕业设计指南《道路工程分册》		长沙理工大学
4	土木工程专业毕业设计指南《隧道与地下工程分册》		长安大学
5	土木工程专业毕业设计指南《桥梁工程分册》		重庆交院
6	土木工程专业毕业设计指南《岩土工程分册》		湖南大学
7	交通工程专业毕业设计指南		长安大学
二、	设计计算示例		
1	桥梁计算示例丛书		
①	拱桥（1）	36元	华中科大
	拱桥（2）		重庆交院
	钢管混凝土拱桥		华南理工
②	连续梁桥（1）		重庆交院
	连续梁桥（2）		华南理工
③	斜拉桥		重庆交院
④	悬索桥（第二版）	16元	重庆交院
⑤	混凝土简支梁（板）桥（第二版）	27元	同济大学
⑥	桥梁地基与基础	16元	湖南大学
2	道路结构计算示例		长安大学
3	简明桥梁施工计算示例		重庆交院
4	隧道设计示例		长安大学
5	《结构设计原理》计算示例		东南大学
6	公路小桥涵设计示例		
三、	工程实习指导书		
	《桥梁工程》		重庆交院

人民交通出版社公路图书介绍

人民交通出版社公路图书部是该社公路图书核心出版部门，现承担国家级重点图书"交通科技丛书"、"现代桥梁技术丛书"、"当代交通领域重要著作丛书"以及"面向二十一世纪交通版高等学校教材"等重点图书的出版任务。联系电话:010－85285983

一、面向21世纪交通版高等学校教材

1.交通工程总论(徐吉谦) …… 32元
2.交通工程专业英语(裴玉龙) …… 28元
3.交通运输工程导论(姚祖康) …… 22元
4.国家规划教材·交通工程学(任福田) …… 42元
5.道路通行能力分析(陈宽民) …… 27元
6.交通流理论(王殿海) …… 21元
7.交通系统仿真技术(刘运通等) …… 26元
8.公路网规划(裴玉龙) …… 27元
9.停车场规划设计与管理(关宏志) …… 30元
10.交通工程设施设计(李峻利主编) …… 35元
11.交通工程设计理论与方法(马荣国) …… 40元
12.智能运输系统概论(杨兆升) …… 25元
13.国家规划教材·交通管理与控制(第二版)(杨佩昆) …… 25元
14.运输经济学(严作人) …… 40元
15.道路交通工程系统分析方法(王　炜) …… 28元

16.交通工程专业生产实习指导书(朱从坤) …… 7元
17.道路建筑材料(李立寒) …… 35元
18.道路勘测设计(第二版)(杨少伟) …… 40元
19.土质学与土力学(第三版)(高大钊) …… 26元
20.路基设计原理与计算(李峻利) …… 40元
21.公路土工合成材料应用原理(黄晓明) …… 22元
22.GPS测量原理及其应用(胡伍生) …… 28元
23.公路经济学教程(袁剑波) …… 23元
24.专业英语(第二版)(李　嘉) …… 30元
25.路基路面工程检测技术(李宇峙) …… 46元
26.测量学(第二版)(许娅娅) …… 34元
27.公路工程地质(三版)(窦明健) …… 23元
28.道路结构力学(上、下)(郑传超、王秉纲) …… 50元
29.城市道路设计(吴瑞麟) …… 22元
30.工程项目招标与投标(周　直) …… 33元(估价)
31.道路管理与系统分析方法(黄小明) …… 34元(估价)
32.公路小桥涵勘测设计(孙家驷) …… 25元(估价)
33.公路环境与景观设计(刘朝晖) …… 30元
34.高速公路(第二版)(方守恩) …… 21元
35.公路工程造价编制与管理(沈其明) …… 31元
36.水泥与水泥混凝土(申爱琴) …… 30元

37.桥梁工程(土木、交通工程)(邵旭东) …… 58元
38.桥梁钢—混凝土组合结构设计原理(黄　侨) …… 26元
39.桥梁检测与加固(王国鼎) …… 27元
40.高等桥梁结构理论(项海帆)(研) …… 35元
41.桥梁结构试验(章关永) …… 22元
42.桥梁抗震(叶爱君) …… 15元
43.桥涵水文(高冬光) …… 24元
44.高等钢筋混凝土结构(周志祥)(研) …… 27元
45.基础工程(第三版)(王晓谋) …… 33元
46.大跨度桥梁结构计算理论(李传习) …… 18元
47.钢桥(徐君兰) …… 16元

48.桥梁计算示例丛书—桥梁地基与基础(赵明华) …… 16元
49.桥梁计算示例丛书—悬索桥(徐君兰) …… 16元
50.桥梁计算示例丛书—混凝土简支梁(板)桥(易建国) …… 27元
51.桥梁计算示例丛书—拱桥(第二版)(王国鼎) …… 36元
52.《道路勘测设计》毕业设计指导(许金良) …… 30元

53.工程项目融资(赵　华) …… 29元
54.管理信息系统(李友根) …… 31元
55.公路工程定额原理与估价(石勇民) …… 34元
56.工程风险管理(邓铁军) …… 21元

57.现代工程机械液压与液力传动(颜荣庆) …… 39元
58.现代工程机械发动机与底盘构造(陈新轩) …… 38元
59.施工机械概论(王　进) …… 35元

二、面向21世纪交通版交通高等职业技术教育路桥专业教材

1.公路工程施工招标投标文件编制示例(文德云) …… 38元
2.公路环境建设与管理(田　平) …… 26元
3.公路概论(高红宾) …… 22元
4.公路工程CAD基础教程(郑益民) …… 26元
5.道路建筑材料(姜志青) …… 29元
6.毕业设计与毕业答辩指导(上) …… 15元
7.毕业设计与毕业答辩指导(下) …… 17元
8.工程地质(齐丽云等) …… 23元
9.公路工程检测技术(金桃等) …… 28元
10.公路工程施工监理基础(李文不) …… 24元
11.公路隧道施工(黄成光) …… 59元
12.工程机械与施工用电(王定祥) …… 33元
13.公路工程建设招标与投标(文德云) …… 30元
14.交通工程学基础(张郃生) …… 19元
15.道路工程制图(刘松雪) …… 29元
16.道路工程制图习题集(曹雪梅) …… 28元
17.工程测量(李仕东) …… 24元
18.工程力学(孔七一) …… 26元
19.公路施工组织设计(马敬坤) …… 16元
20.道路工程专业英语(蔺延河) …… 19元
21.公路工程项目管理(陈　烈) …… 27元
22.土质与土力学(孟祥波) …… 21元
23.结构力学(李　轮) …… 25元
24.公路工程造价(陆春其) …… 24元
25.城市道路设计(王建成) …… 24元
26.公路养护技术与管理(彭富强) …… 16元
27.结构设计原理(孙元桃) …… 23元
28.公路设计(金仲秋) …… 36元
29.桥涵施工技术(王常才) …… 39元
30.基础工程(陈晏松) …… 19元

31.桥涵设计(白淑毅) …… 26元
32.桥涵水力水文(俞高明) …… 28元
33.公路施工技术(俞高明) …… 26元
34.汽车安全检测(杜兰卓) …… 25元

三、交通职业技术院校路桥专业教学参考书

1.试题集及题解第二版(1~4辑) …… 全套108元
2.《地质与土质》实习实验指导 …… 12元
3.课程设计指导 …… 27元
4.桥梁施工组织与管理基础(王洁) …… 21元
5.道路建筑材料试验指导书(姜志青) …… 18元

三、高等学校教材

1.交通土建工程制图(第二版)(和丕壮) …… 38元
2.交通土建工程制图习题集(第二版)(和丕壮) …… 20元
3.地铁与轻轨(张庆贺) …… 39元
4.高等学校会计(谢军占) …… 30元
5.土木工程水文学(叶镇国) …… 26元
6.土木工程水文学原理及习题解法指南(叶镇国) …… 33元
7.拱桥连拱计算(第二版)(王国鼎) …… 35元
8.桥梁建筑美学(盛洪飞) …… 56元
9.交通土木工程测量(张坤宜) …… 33元
10.公路桥梁电算(第二版)(杨炳成) …… 35元
11.桥梁桩基计算与检测(赵明华) …… 24元
12.岩土工程施工技术与环境保护(杨林德) …… 28元
13.预应力混凝土结构设计原理(李国平) …… 25元
14.土木工程计算机绘图基础(肖守平) …… 39元
15.交通工程学(第二版)(李作敏) …… 28元
16.施工企业经营管理(陈传德) …… 24元
17.工程项目管理(周直) …… 20元
18.道路规划与设计(李清波) …… 46元
19.现代工程机械液压与液力系统(颜荣庆) …… 39元
20.桥梁施工及组织管理(上)(99版)(黄绳武) …… 36元
21.桥梁施工及组织管理(下)(99版)(苏寅申) …… 29元
22.结构稳定与稳定内力(李存权) …… 23元
23.公路计算机辅助设计(符锌砂) …… 30元
24.公路实用勘测设计(何景华) …… 19元
25.无粘结与部分预应力结构(房贞政) …… 19元
26.水泥混凝土路面施工与施工机械(何挺继) …… 30元
27.现代公路施工机械(何挺继) …… 45元
28.工程机械机电液一体化(焦生杰) …… 28元

四、公路施工现场技术人员培训教材

1.公路施工技术 …… 65元
2.公路施工测量技术 …… 42元
3.公路工程定额与统计 …… 25元
4.公路工程试验与检测 …… 30元
5.公路工程材料与管理 …… 38元
6.公路施工安全技术 …… 30元

五、机场工程系列教材(全套)112元

1.机场排水设计(李国平)
2.机场施工与管理(黄灿华)
3.机场地势设计优化与CAD技术(蔡良荣)

六、高速公路从业人员培训教程

1.收费岗位 …… 23元(估价)
2.养护岗位 …… 33元(估价)
3.路政岗位 …… 32元(估价)
4.机电岗位 …… 30元(估价)

七、公安部、建设部实施畅通工程科技丛书

1.城市交通管理规划指南 …… 30元
2.城市道路交通设计指南 …… 30元
3.城市交通管理评价体系 …… 30元

八、丛书类

公路桥梁设计丛书

1.悬索桥设计(雷俊卿)(第十一届全国优秀科技图书获奖书目) …… 56元
2.桥梁通用构造及简支梁桥(胡兆同) …… 25元
3.刚架桥(邹晓光) …… 23元
4.预应力混凝土连续梁桥设计(徐　岳) …… 55元
5.斜拉桥(刘士林) …… 50元

公路建设百问丛书

1.隧道设计与施工百问(李宁军) …… 27元
2.桥梁施工百问(刘吉士) …… 52元
3.公路建设管理知识百问(杨　琦) …… 30元
4.桥梁检测与维修加固百问(徐　犇) …… 25元
5.公路工程概预算百问(符凤岐) …… 18元
6.公路工程质量问题及防治措施百问(王国清) …… 35元
7.桥梁设计百问(邵旭东) …… 27元
8.公路设计百问(李嘉) …… 38元
9.公路施工项目管理知识百问(廖正环) …… 22元

交通科技丛书

1.水泥混凝土路面设计与施工(王秉纲) …… 48元
2.混凝土搅拌理论与设备(冯忠绪) …… 22元
3.水泥混凝土路面设计理论与方法(姚祖康) …… 38元
4.道路安全工程(郭忠印) …… 55元
5.高速公路软土地基处理技术(中交一勘院) …… 30元
6.路面管理系统原理(潘玉利) …… 38元
7.沥青路面施工与维修技术(郝培文) …… 35元
8.高等级公路半刚性基层沥青路面(沙庆林) …… 78元
9.高速公路收费系统理论与方法(刘伟铭) …… 45元
10.水泥混凝土路面滑模施工技术(傅智) …… 58元
11.乳化沥青与稀浆封层技术(乳化沥青学组) …… 26元
12.沥青路面施工机械与机械化施工(筑机学会) …… 45元
13.中国智能运输系统体系框架(国家ITS专题组) …… 90元
14.悬索桥结构非线性分析理论与方法(潘永仁) …… 26元
15.道路交通组织优化(翟忠民) …… 56元
16.停车场规划设计与管理(关宏志) …… 30元

现代桥梁技术丛书

1.斜拉桥(第二版)(林元培) …… 38元
2.预应力混凝土梁拱组合体系桥梁(金成棣) …… 48元
3.桥梁深水基础(刘自明) …… 68元

当代交通领域重要著作丛书

1.沥青及沥青混合料路用性能(沈金安) …… 68元
2.路面分析与设计(黄仰贤·美,余定选译) …… 70元

高速公路丛书

1.高速公路规划与设计(编委会) ………… 27元
2.高速公路路基设计与施工(编委会) ………… 46元
3.高速公路交通工程及沿线设施(编委会) ………… 42元
4.高速公路建设管理(编委会) ………… 62元
5.高速公路立交工程(编委会) ………… 48元
6.高速公路路面设计与施工(编委会) ………… 72元
7.高速公路环境保护与绿化(刘书套) ………… 23元
8.高速公路运营管理(第二版)(编委会) ………… 38元
9.高速公路养护管理(编委会) ………… 38元

厦门海沧大桥建设丛书

1.建设与管理(一) ………… 50元
2.科研·试验·专用技术标准(二) ………… 60元
3.桥梁景观(三) ………… 42元
4.东航道悬索桥(四) ………… 70元
5.西航道连续刚构桥(五) ………… 25元
6.互通立交·引桥·引道(六) ………… 32元
7.交通工程·桥路面铺装(七、八) ………… 66元
8.摄影专集 ………… 118元

公路机械化施工与养护技术丛书

1.石料生产技术(姚望科) ………… 34元
2.公路工程机械化施工(费建国) ………… 39元
3.高等级公路养护技术与养护机械(郭贵子) ………… 42元
4.沥青路面机械化施工技术与质量控制(郑明建) ………… 16元
5.高速公路机械化施工及组织管理(廖正环) ………… 23元
6.公路机械化施工现代管理技术(王国安) ………… 13元

九、培训教材类

公路工程监理培训教材

1.合同管理(曹俊辉) ………… 24元
2.工程费用监理(张建仁) ………… 15元
3.监理概论(刘健新) ………… 18元
4.工程质量监理(李宇峙) ………… 17元
5.工程进度监理(琴晓光) ………… 16元

公路工程试验检测技术培训教材

1.公路几何线形检测技术(王文锐) ………… 13元
2.路基路面试验检测技术(徐培华) ………… 29元
3.桥涵工程试验检测技术(胡大琳) ………… 26元
4.隧道工程试验检测技术(吕康成) ………… 15元
5.交通工程试验检测技术(陈红) ………… 17元

十、手册指南类

公路桥涵设计手册

1.基本资料(毛瑞祥主编) ………… 46元
2.涵洞(顾克明主编) ………… 32元
3.拱桥(上)(石绍甫主编) ………… 50元
4.拱桥(下)(顾安邦主编) ………… 36元
5.墩台与基础(江祖铭主编) ………… 42元
6.梁桥(上)(徐光辉主编) ………… 52元
7.梁桥(下)(刘效尧主编) ………… 52元
8.预应力技术及材料设备(刘效尧主编) ………… 28元
9.桥梁附属构造与支座(金吉寅主编) ………… 46元
10.桥位设计(高冬光主编) ………… 42元

公路设计手册

1.路基(第二版)(交通部) ………… 78元
2.路面(第二版)(姚祖康主编) ………… 46元

公路施工手册

1.基本作业(杨理准主编) ………… 46元
2.桥涵(上)新版(公路一局) ………… 132元
3.桥涵(下)新版(公路一局) ………… 143元
4.工程材料 ………… 128元
5.路基(路桥集团第二工程局) ………… 138元

公路行业名师文丛

1.可与共学(姚祖康) ………… 60元
2.累珍求索(张登良) ………… 78元

同盟工程师系列丛书

1.公路工程投标实务与快速报价分析(张铁成) ………… 48元
2.公路工程造价与快捷编标(修订版)(张铁成) ………… 59元

岩土工程丛书

1.工程降水设计施工基础渗流理论(吴林高) ………… 30元
2.深基础工程特殊技术问题(史佩栋) ………… 72元

其它手册、指南、文件汇编

1.公路工程概预算手册(沈其明) ………… 78元(估价)
2.现代工程测量仪器应用手册(冯晓) ………… 62元(估价)
3.桥梁施工违规纠正手册(苏权科) ………… 45元
4.水泥混凝土路面养护维修手册 ………… 32元
5.高速公路养护管理手册(手册编委会) ………… 98元
6.现代混凝土配合比设计手册(张应立) ………… 92元
7.湖北省京珠高速公路桥梁养护技术手册 ………… 50元
8.公路水泥混凝土路面施工技术规范实施与应用指南(常　智) ………… 44元
9.公路机械化施工手册(何挺继) ………… 98元
10.混凝土全过程质量管理手册(张应立) ………… 49元
11.公路排水设计手册(姚祖康) ………… 26元
12.英汉道路工程词汇(第四版)(黄兴安) ………… 118元
13.县乡公路手册(广州公路局) ………… 88元
14.公路工程施工监理手册(第二版)(御公路司) ………… 120元
15.公路机务管理手册(中国筑机学会) ………… 50元
16.公路工程建设项目计量与支付手册(邹晓光) ………… 72元
17.路桥施工计算手册(周水兴) ………… 92元
18.交通土建软土地基工程手册(河海大学) ………… 138元
19.交通工程手册(公路学会) ………… 88元
20.筑路机械手册(何挺继主编) ………… 175元
21.国外公路工程机械技术性能手册 ………… 32元
22.公路施工项目管理手册(陈传德主编) ………… 60元
23.公路设计交通安全审查手册(冯桂炎) ………… 36元
24.实用土木工程手册(第三版)(杨文渊) ………… 98元
25.简明公路施工手册(第二版)(杨文渊) ………… 78元
26.公路施工测量手册(张让等) ………… 43元
27.简明工程机械施工手册(杨文渊主编) ………… 68元
28.公路小桥涵手册(河北交规院) ………… 30元
29.公路工程混合料配合比设计与试验技术手册(徐培华) ………… 50元
30.公路设计工程师手册(刘伯莹、姚祖康) ………… 82元
31.道路勘测设计软件开发与应用指南(朱照宏) ………… 78元
32.沥青路面道路质量评估及养护指南(路桥总公司译)

…… 12元

33.公路工程质量通病防治指南(部公路司) …… 72元

34.西部通县公路建设技术指南(部公路司) …… 50元

35.公路工程招标与投标指南(王清池等) …… 45元

36.山区高速公路勘察设计指南(中交一勘院) …… 48元

37.公路工程造价指南(杨子敏) …… 68元

38.公路设计指南(陈胜营) …… 30元

39.桥梁监理工程师指南(增订版)(王文涛) …… 26元

40.公路路基路面施工监理指南(修订版)(颜焕荣) …… 31元

41.桥梁与隧道施工监理指南(刘吉士) …… 33元

42.河北公路建设技术指南(河北交通厅公路管理局) …… 50元

43.公路交通安全设施标准汇编 …… 92元

44.公路工程国内招标文件范本(2003年版)(上、下册) …… 92元

45.公路工程勘察设计招标文件范本 …… 68元

46.公路工程勘察设计招标资格预审文件范本 …… 16元

47.公路建设招标投标法规文件汇编 …… 24元

48.公路建设管理法规文件汇编(2002版)(部公路司) …… 90元

49.公路基本建设与交通工程概预算编制办法

及各省补充规定汇编 …… 29元

50.高速公路联网收费暂行技术要求 …… 40元

十二、特别推荐

1.公路建设项目环境后评价分析(董小林) …… 26元

2.国外沥青路面设计方法总汇(沈金安) …… 80元

3.悬索桥上部结构施工(周昌栋) …… 60元

4.湖北省军山长江公路大桥技术总结 …… 86元

5.道路安全指南(刘运通) …… 63元(估价)

6.公路小桥涵设计示例(刘培文) …… 31元(估价)

7.公路挡土墙施工(陈忠达) …… 29元

8.《中华人民共和国道路交通安全法》通释(张世诚) …… 16元

9.合安高速公路工程建设论文集 …… 40元

10.高等级公路路基路面养护技术(徐培华) …… 32元

11.公路桥梁荷载试验(谌润水) …… 58元

12.边坡工程处治技术(赵明阶) …… 38元

13.公路与桥梁水毁防治(高冬光) …… 42元

14.九景高速公路论文集 …… 50元

15.工程施工组织设计编制与管理(李　辉) …… 30元

16.公路钢桥腐蚀与防护(任必年) …… 33元

17.湖北省京珠高速公路建设论文集(湖北交通厅) …… 90元

18.江苏省高速公路建设论文集(连徐、宁靖盐)(江苏交通厅)

…… 70元

19.桥梁施工及备机械设备(李自光) …… 68元

20.山区高速公路建设与管理(云南公路学会) …… 68元

21.压实与摊铺(美卓戴纳派克公司) …… 58元

22.超长大桥梁建设的序幕(刘建新译) …… 35元

23.岩土工程的回顾与前瞻(高大钊) …… 56元

24.高速公路沥青路面早期破坏现象及预防(沙庆林) …… 45元

25.黄土地区高速公路施工新技术 …… 30元

26.公路建设单位会计实务(刘晓燕) …… 42元

27.桥梁结构空间分析设计方法与应用(戴公连) …… 25元

28.高墩大跨连续刚构桥(马宝林) …… 25元

29.灌注桩检测与处理(张宏) …… 22元

30.现代公路勘测设计实用技术(第二版)(刘培文) …… 53元

31.八一大桥建设与管理 …… 40元

32.全国优秀公路勘察设计技术交流成果汇编(部公路司) …… 68元

33.公路旧桥加固技术与实例(谌润水等) …… 38元

34.真空降水预压法加固软土技术(娄　炎) …… 20元

35.高等级公路软土地基路堤设计与施工技术(王晓谋)

…… 25元

36.高等级公路控制测量(聂　让) …… 33元

37.路基路面施工及组织管理(张　润) …… 39元

38.互通式立体交叉设计范例(带光盘)(吴国雄、李　方)

…… 41元

39.道路通行能力分析(张起森) …… 28元

40.桥梁结构高耐久性混凝土设计与施工规程 …… 6元

41.桥梁损伤诊断(刘效尧) …… 30元

42.宜昌长江公路大桥工程建设论文集 …… 70元

43.河北公路论文集—建设与发展问题研究 …… 70元

44.公路边坡防护与治理(杨航宇) …… 26元

45.公路施工组织及概预算(1999年)(张起森) …… 27元

46.公路工程投资、估算与概、预算编制示例(郑凤俊) …… 25元

47.高速公路机电系统(黄小雄) …… 35元

48.城市道路交通(郑祖武) …… 22元

49.曲线梁桥计算(孙广华) …… 16元

50.连续桥面简支梁桥墩台计算实例(袁伦一) …… 14元

51.高速公路路政管理(范　锟) …… 17元

52.现代筑路机械电液控制技术(焦生杰) …… 16元

53.复合式路面设计原理与施工技术(胡长顺) …… 23元

54.振动压路机及振动压实技术(李　冰) …… 45元

55.高等级公路施工技术与管理(王明怀) …… 68元

56.公路桥梁伸缩装置(李扬海) …… 18.5元

57.全站仪与高等级公路测量(聂　让) …… 20元

58.滑模式水泥混凝土摊铺机及施工技术(颜荣庆) …… 22元

59.斜拉桥换索工程(王文涛) …… 22元

60.沥青加热技术(王志廷) …… 20元

61.机场场道工程施工(蔡永田) …… 24元

62.公路工程实用电算(廖正环) …… 30元

63.高等级公路建设与管理(吴海燕) …… 17元

64.半刚性路面材料结构与性能(沙爱民) …… 13.8元

65.公路CAD技术(许金良) …… 14.6元

66.拔拱与不对称拱(郭临义) …… 17元

67.混凝土斜梁桥(黄平明) …… 18元

68.现代混凝土结构技术(郑建岚) …… 20元

69.公路工程八大通病分析与防治(山西公路局) …… 15元

70.钢管混凝土拱桥设计与施工(陈宝春) …… 36元

71.塑料板排水法加固软基工程实例集 …… 26元

72.公路挡土墙设计(陈忠达) …… 19元

73.桥梁悬臂施工与设计(曹俊卿) …… 34元

74.顶管施工技术(新版)(余彬泉) …… 31元

75.加筋土工程设计与施工(何光春) …… 23元

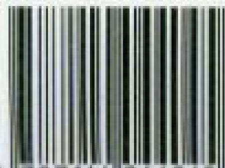
76.水泥混凝土路面施工及新技术(吴初航) …… 28元

77.公路工程施工监理实务(修订版)(刘吉士) …… 16.8元

78.现代道路交通测试技术(孙朝云) …… 23元

79. 公路工程施工监理400问答(文德云) ······ 22元
80. FIDIC条款与公路工程施工监理(李宇峙) ······ 58元
81. 公路施工企业管理(精)(山西公路局) ······ 50元
82. 桥梁工程估算及概预算编制实例(袁　方) ······ 28元
83. 公路工程常用仪器使用与检修(张巢玉) ······ 25元
84. 工程机械故障剖析与处理(焦福全) ······ 26元
85. 混凝土损伤断裂(秦四维) ······ 16元
86. 江阴长江公路大桥工程建设论文集 ······ 70元
87. 桥梁施工控制技术(向中富) ······ 39元
88. 刚构－连续组合梁桥(王文涛) ······ 30元
89. 公路桥梁荷载横向分布计算方法(贾检海) ······ 20元
90. 公路工程实用测设技术(王文锐) ······ 22元
91. 公路沥青路面养护新技术(常魁和) ······ 28元
92. 美国公路桥梁设计规范 ······ 98元
93. 柴油机构造与维修(朱军) ······ 26元

组稿编辑／韩　敏　沈鸿雁
责任编辑／席少楠
封面设计／彭小秋



ISBN 7-114-04404-6
U · 03245
定价：28.00元